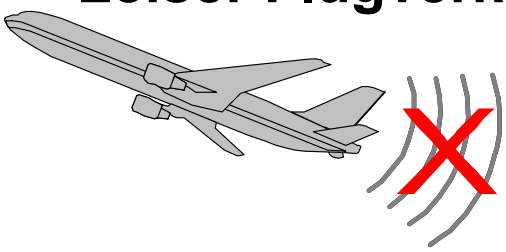
Deutsches Zentrum
Für Luft- und Raumfahrt e.V.

DLR

Leiser Flugverkehr



Zusammenfassender Projekt-Abschlussbericht

5. Juli 2004

Inhaltverzeichnis

Inhaltverzeichnis 1-1

Einleitung 1-2

1. Hintergrund des Projektes 1-3

2. Ziele des Projektes 2-1

3. Humanspezifische Wirkung des Nachtfluglärms 3-1

4. Minderung des Triebwerkslärms 4-1

5. Minderung des Umströmungslärms 5-1

6. Lärmarme Flugverfahren 6-1

7. Verkehrspolitische Lärmminderungskonzepte 7-1

8. Fluglärmberechnungsverfahren 8-1

9. Schallausbreitungsmodelle 9-1

10. Zusammenfassung der Projektergebnisse 10-1

Einleitung

Der vorliegende Bericht stellt eine zusammenfassende Darstellung des DLR-Projekts „Leiser Flugverkehr“ dar. Er gliedert sich wie folgt:

- Im **Kapitel 1** wird auf die Hintergründe eingegangen, die letztendlich zur Initialisierung des Projekts führten. Die generelle Zielsetzung des Projektes, die Projektstruktur sowie die speziellen
- Ziele der einzelnen Arbeitspakete werden im **Kapitel 2** behandelt. Die folgenden Kapitel beschreiben die Arbeitspakete in detaillierterer Form (Ziele, Forschungsansätze und durchgeführte Arbeiten):
- Im **Kapitel 3** werden die Aktivitäten zur Definition eines Kriteriums zur Beschreibung der humanspezifischen Wirkungen von Nachtfluglärm dargestellt. Anlass für diese Arbeiten war die Tatsache, dass nächtlicher Fluglärm derzeit eine der maßgeblichsten negativen Folgewirkungen des Luftverkehrs darstellt. Vor dem Hintergrund, dass bezüglich der Bewertung von Nachtfluglärm weitestgehend noch keine Einigkeit besteht, muss diesen Arbeiten eine besonders umweltrelevante Bedeutung zugeschrieben werden.
- Der nahe liegende Ansatz, die Fluglärmbelastung am Boden zu mindern, ist natürlich die Lärmminderung an der Quelle selbst. Dabei muss – insbesondere bei modernen Verkehrsflugzeugen – unterschieden werden zwischen dem Lärm, der durch das Triebwerk hervorgerufen wird und dem durch die Umströmung von Rumpf, Tragflächen und Fahrwerk erzeugten Lärm. Konzepte zur Minderung des Triebwerkslärms werden im **Kapitel 4** beschrieben, **Kapitel 5** setzt sich mit der Untersuchung des Umströmungslärms auseinander. Zielsetzung war jeweils die Bereitstellungen von technischen Konzepten, die die Triebwerks- und Flugzeugindustrie in die Lage versetzen, künftig schon beim Flugzeugdesign den Aspekt der Lärmminderung in adäquater Weise zu berücksichtigen.
- Während technologische Maßnahmen an Triebwerk und Zelle in der Regel erst mittel- bis langfristig umsetzbar sind, bestehen auch kurz- und mittelfristige Möglichkeiten zur Minderung des Lärms in der Flughafenumgebung. Eine ist die Anwendung von lärmmindernden Flugverfahren, die im **Kapitel 6** erläutert wird. Neben diesen operationellen Maßnahmen besteht auch die Möglichkeit, durch gezielte Steuerungsmaßnahmen des Luftverkehrs lärmmindernde Effekte zu erzielen. Mit diesem Themenkomplex wird sich im **Kapitel 7** auseinandergesetzt.
- Ein wesentliches Hilfswerkzeug bei der Validierung von Lärmminderungskonzepten ebenso wie bei der Umsetzung und Kontrolle von planerischen Maßnahmen zur Lärmminderung sind Fluglärmprognoseverfahren. Im **Kapitel 8** wird die Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Berechnung von Fluglärm beschrieben, sowie dessen Einsatzmöglichkeiten bei der Optimierung von Lärmminderungsmaßnahmen und von konventionellen Verfahren zur Berechnung von Fluglärm. Besondere Bedeutung kommt dabei einer soliden Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge in der Atmosphäre zu. Im **Kapitel 9** wird ein neuartiges Schallausbreitungsmodell vorgestellt, das auf dem Ansatz einer ganzheitlichen und konsistenten Beschreibung des Komplexes Topographie – Meteorologie beruht.
- Eine zusammenfassende Darstellung der Resultate findet sich im **Kapitel 10**.

Dieser Bericht kann aufgrund des Umfangs des Projektes nur eine Zusammenfassung der abgewickelten Forschungsarbeiten darstellen. Detailliertere Informationen können den in den einzelnen Abschnitten zitierten weitergehenden Veröffentlichungen entnommen oder direkt über die Arbeitspaketkoordinatoren per E-Mail erfragt werden.

1. Hintergrund des Projektes

1.1. Problemstellung

Der Fluglärm ist in Deutschland ein drängendes Umweltproblem, das vor allem die Akzeptanz und die weitere Entwicklung des Luftverkehrs in Zukunft behindern kann. In den letzten Jahren konnte der Fluglärm im Umfeld deutscher Verkehrsflughäfen durch Ausmusterung alter und lauter Flugzeuge vermindert werden: Fortschritte vor allen Dingen auf dem Gebiet der Triebwerkstechnik haben in den letzten 30 Jahren zu einer Absenkung der spezifischen Lärmemission von Flugzeugen um etwa 25 dB geführt. Der Prozess der Ausmusterung ist heute aber nahezu abgeschlossen, so dass in den kommenden Jahren bei steigendem Flugverkehr der Fluglärm wieder zunehmen wird, sofern keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Vor allem der nächtliche Fluglärm stellt ein maßgebliches Problem dar, das große Anstrengungen verlangt, damit die Fluglärmbelastung sowohl kurz- als auch langfristig sinkt. Dabei ist jedoch auch der strategischen und ökonomischen Bedeutung des Luftverkehrs Rechnung zu tragen.

Die weitere technische Reduktionsmöglichkeit des Triebwerks- und Zellenlärms wird von den Fachleuten auf etwa 10 dB eingeschätzt. Dieses Potential wird allerdings nur mittel- bis langfristig vollständig ausschöpfbar sein, so dass andere, kurzfristig wirksame Lärmminderungsmöglichkeiten ebenfalls in Betracht gezogen werden müssen. Dazu gehören u.a. verbesserte An- und Abflugverfahren und verkehrspolitische Maßnahmen.

Zur Beurteilung der Effizienz konzeptionell unterschiedlicher Maßnahmen ist eine sehr genaue Kenntnis der auf Lärm bezogenen Kausalkette „Emission-Ausbreitung-Immission-Wirkung“ notwendig, was zu der hier vorgestellten integrierten Vorgehensweise veranlasst hat, um die noch bestehenden Wissensdefizite zu beseitigen.

Als die für Luftfahrtforschung zuständige Einrichtung in Deutschland war das DLR aufgefordert, den wichtigen Problembereich „Fluglärm” in seinen wesentlichen Aspekten zu bearbeiten. Es hat sich dieses aktuellen gesellschaftsrelevanten Themas – aufgrund der Notwendigkeit einer umgehenden Behandlung – zu Beginn des Jahres 1999 angenommen. Nach erfolgreicher Beantragung einer Förderung durch den Strategiefonds der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren wurde das Projekt seit Juli des Jahres 2000 für drei Jahre in integrierter und erweiterter Form im HGF-Verbund durchgeführt. Damit wurde dieses Thema der Vorsorgeforschung als strategisch wichtiges Anliegen der HGF erkennbar.

1.2. Projektansatz

In der Praxis wurden bisher meist die Wirkungen einzelner lärmmindernder Maßnahmen untersucht. Ein ganzheitliches Bild über Lärmszenarien, Wirkungsmuster und gezielt strukturierte Gegenmaßnahmen besteht nicht. Im Projekt sollten daher Methoden, Maßnahmen und Technologien entwickelt werden, die die Lärmbelastung trotz Erhöhung des Luftverkehrsaufkommens mittel- und langfristig zu reduzieren helfen. Unter anderem sollte die Analyse der Wirkungen insbesondere des nächtlichen Fluglärms auf den Menschen in die Bewertung von Maßnahmen zur Lärmminderung mit einfließen. Hintergrund war eine Entlastung der Bevölkerung bei gleichzeitiger Sicherung der Entwicklung des Luftverkehrs in Deutschland.

Da aus Gründen des Wettbewerbs die Handlungsmöglichkeiten der Industrie eingeschränkt sind (Kosten bei Herstellern und Betreibern), muss es Aufgabe der Großforschung sein, das Lärmsenkungspotential bei Flugzeugen zu demonstrieren – nicht zuletzt, um die internationalen Gremien zu veranlassen, die von künftigen Flugzeugen einzuhaltenden Grenzwerte deutlich zu senken.

Die im DLR vorhandenen Fähigkeiten und Aktivitäten auf den Gebieten der Medizin, Aeroakustik, Flug- und Triebwerkstechnik, Atmosphärenphysik, Flugführung und Verkehrsforschung wurden im Rahmen des Projekts gebündelt und zu einem internen Netzwerk verknüpft. Die Vielfalt und Komplexität der Aufgaben verlangte außerdem die Mitwirkung kompetenter Partner aus Industrie und Forschung, die über ein offenes Netzwerk eingebunden waren.

Durch eine strukturierte Kommunikation und Zusammenarbeit (u.a. in Form eines externen Beraterkreises) wurden daher Luftfahrtindustrie, Fluggesellschaften, Flughäfen, Behörden und Lärmbetroffene in das Projekt mit einbezogen. Sie wurden laufend mit dem Stand und den Ergebnissen des Projekts vertraut gemacht. Die Koordination der eigentlichen Forschungs- und Technologiearbeiten und der Transfer der Ergebnisse zu Partnern und Nutzern wurden durch das Projektmanagement gewährleistet. Ein Lenkungsausschuss auf Institutsleiterebene überwachte das Projekt.

1.3. Beziehungen zu Leitkonzepten und Verbundvorhaben

Das interdisziplinäre Projekt war auf nationaler Ebene Bestandteil des vom DLR initiierten und koordinierten nationalen Forschungsverbundes „Leiser Verkehr“. So konnten Synergien aus Arbeiten zur Lärmminderung im Straßen- und Schienenverkehr und aus der im Verbund breit angelegten Querschnitts- und Lärmwirkungsforschung genutzt werden. Auf europäischer Ebene wurde es - zunächst informell - einbezogen in die Arbeitsgruppe der europäischen Luftfahrtforschungseinrichtungen EREA und in das von der Europäischen Kommission eingerichtete thematische Netzwerk X-Noise.

Bei der Lärmwirkungsforschung erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Universitäten Dortmund und Düsseldorf. Hier wurde insbesondere auf das im Verbundvorhaben „Leiser Verkehr“ initiierte Netzwerk zugegriffen. Der Flughafen Köln-Bonn unterstützte die Aktivitäten im Bereich der Lärmwirkungsforschung bei den durchgeführten Felduntersuchungen durch Bereitstellung von Luftverkehrsdaten als Grundlage zur Definition des Untersuchungsraumes.

Auf dem Gebiet des Triebwerks- und Umströmungslärms bestanden schon Industriekooperationen (z.T. im Rahmen von EU-Projekten) mit MTU, BMW-RR, DaimlerChrysler Forschung und Technik, DaimlerChrysler Aerospace Airbus, Rolls-Royce, SNECMA, Airbus und Messier-Dowty sowie Kooperationen mit den Großforschungseinrichtungen NLR und ONERA. Mit weiteren Firmen erfolgte ein enger Informationsaustausch. Insbesondere MTU, BMW-RR und DaimlerChrysler Aerospace Airbus haben das Projekt aktiv mit unterstützt.

Die Arbeiten zu lärmmindernden Flugverfahren erfolgten in Abstimmung und Kooperation mit der Deutschen Lufthansa und der Deutschen Flugsicherung.

In den Arbeitspaketen zu verkehrspolitischen Maßnahmen und zur Fluglärmprognose wurde auf die langjährigen intensiven Kontakte zu den deutschen Verkehrsflughäfen und den maßgeblichen Behörden zurückgegriffen.

2. Ziele des Projektes

2.1. Übergeordnetes Ziel

Das Projekt war längerfristig angelegt und setzte in einem offenen Netzwerk mit Partnern einen erkennbaren Schwerpunkt der Fluglärmforschung in Deutschland. Dabei sollten nicht nur technologische und operationelle Grundlagen zur Reduktion der Lärmbelastung geschaffen, sondern auch die Relationen und Wechselwirkungen von Lärmemission, -immission und Lärmwirkung beleuchtet werden. Zielsetzung war die sukzessive Bereitstellung verlässlicher Methoden, gesicherter Daten und technisch machbarer Lösungen, um in Zukunft das Wachstum des für Mobilität und Wirtschaft wichtigen Flugverkehrs zu ermöglichen und dabei den Fluglärm auf den Flughafennahbereich zu beschränken.

Zur Erreichung dieser Ziele waren vielfältige, aufeinander abgestimmte oder vernetzte Forschungsaktivitäten erforderlich:

• Bewertungskriterien für humanspezifische Nachtfluglärmwirkungen	➢ Schaffung der wissenschaftlichen Grundlage für gezielte Lärmminderungsstrategien (Technik und Betrieb) und für Planungsmaßnahmen
• Minderung des Lärms an der Quelle (Triebwerks- und Umströmungslärm)	➢ Schaffung technologischer Grundlagen für leises Fluggerät und von design-to-noise-Verfahren; Unterstützung der Produktinnovation
• Minderung der Lärmbelastung am Boden durch operationelle Maßnahmen (lärmarme An- und Abflugverfahren)	➢ Empfehlungen und Verfahren für Flugsicherung, Fluggesellschaften und Flughäfen
• Analyse und Bewertung verkehrspolitischer Lärmminderungskonzepte	➢ Empfehlungen an Gesetzgeber, Flughäfen und Fluggesellschaften
• Schaffung hochwertiger Lärmprognoseverfahren	➢ Sachgerechte Absicherung öffentlicher Planungen und gesetzgeberischer Maßnahmen

Die Arbeiten und ihre Ergebnisse – wie auch die hier zu entwickelnden fortschrittlichen Datenerfassungs- und Datenanalysetechniken – können zur Lösung ähnlicher Problemstellungen bei anderen Verkehrsträgern (Straßen- und Schienenfahrzeuge) beitragen und fügen sich zur Reduzierung der humanspezifischen Lärmbelastung somit in die strategischen Konzepte von DLR und HGF sowie das Verbundvorhaben „Leiser Verkehr“ ein.

2.2. Überblick über die Arbeitspakete

Das Projekt gliederte sich in 5 Hauptarbeitspakete (HAP), von denen sich die Hauptarbeitspakete 2 und 5 in zwei separate Arbeitspakete (AP) aufteilten. Abbildung 2-1 zeigt eine Übersicht über die Arbeitspaketstruktur und funktionale Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen:

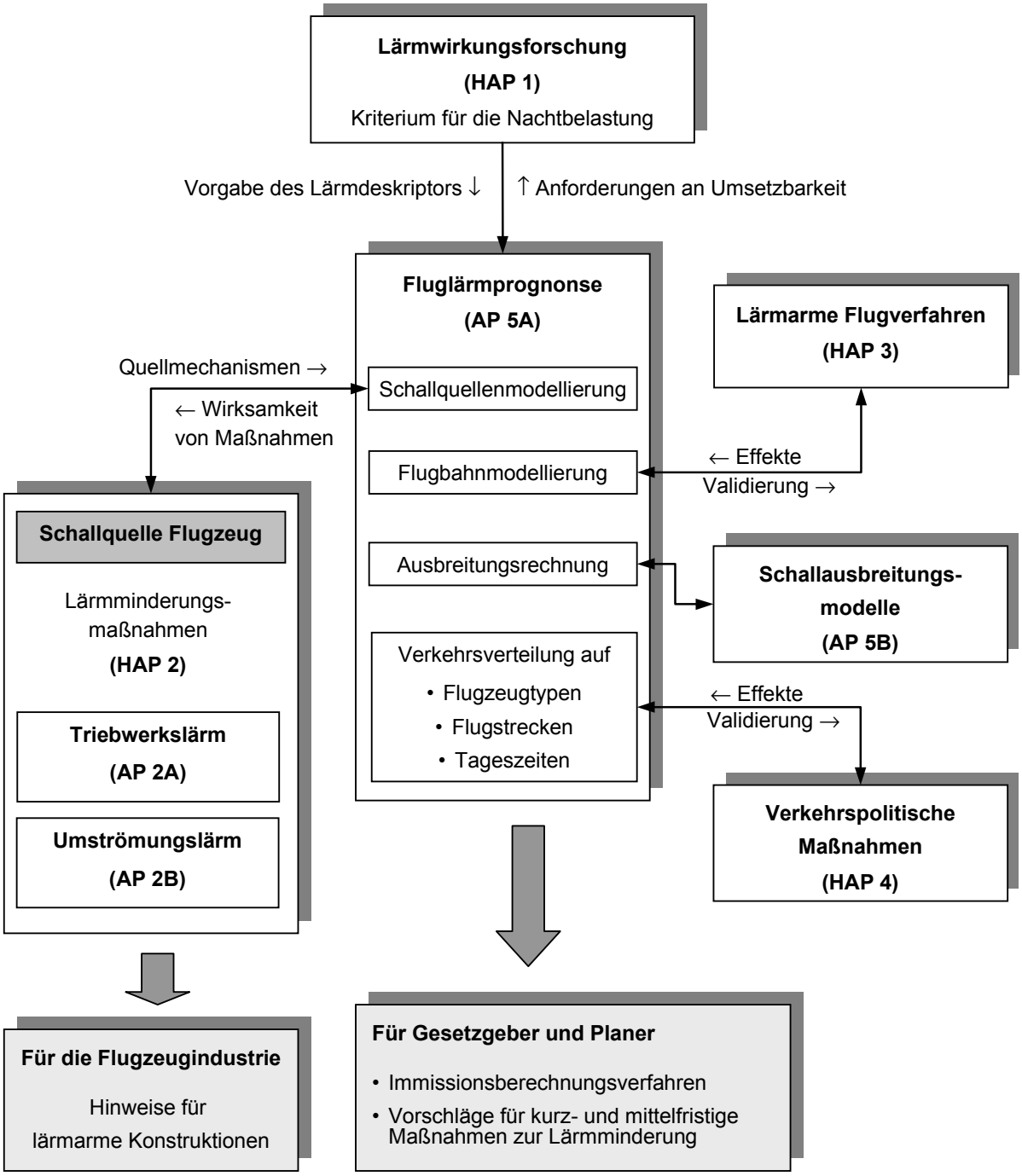


Abb. 2-1: Arbeitspaketstruktur und funktionale Zusammenhänge

3. Humanspezifische Wirkung des Nachtfluglärms

Hauptarbeitspaket 1: ***Dr. Alexander Samel, E-Mail:*** alexander.samel@dlr.de
DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin,
Abteilung Flugphysiologie, Köln

3.1. Einleitung

Das Hauptarbeitspaket „Fluglärmwirkungen“ steht am Ende der Kette „Schallemission (Lärmentstehung an der Quelle Flugzeug)“ – „Schallausbreitung“ – „Schallimmission“ – „Schallwirkung auf den Menschen“.

In diesem Arbeitpaket wurden die Wirkungen von Nachtfluglärm auf den Schlaf des Menschen an einem großen Versuchspersonenkollektiv untersucht und Kriterien für eine Bewertung dieser Wirkungen entwickelt. Das DLR will hiermit zur Versachlichung der teilweise hoch emotional geführten Diskussionen beitragen.

Ausführliche Informationen zu Design und Ergebnissen der Studie sind in verschiedenen Forschungsberichten zu finden, die im Internet als PDF-Dokumente unter folgender Adresse veröffentlicht werden: www.dlr.de/flugphysiologie

3.2. Forschungsziel

Die Zielsetzung des Arbeitspakets innerhalb des DLR-Projekts war die wissenschaftlich fundierte Definition von Nachtfluglärmkriterien.

Die Motivation für die Durchführung ergibt sich aus mehreren Aspekten:

- die wachsende Mobilität von Menschen und Waren. Sie wird zu einem weiteren Anstieg von Flugbewegungen in den nächsten Jahren führen; insbesondere Tagesrand- und Nachtzeiten könnten auf Grund der Auslastung am Tage davon betroffen sein,
- die Betroffenheit der Flughafen-Anwohner, die sich durch den wachsenden Flugverkehr belastet und belästigt fühlen,
- die geplante Novellierung des Fluglärmschutzgesetzes, welche schon seit Jahren diskutiert wird,
- sowie insbesondere fehlende Primärstudien. Die Basis für wissenschaftliche Kriterien und Bewertungen ist in Bezug auf akute physiologische Reaktion sehr schmal und hat das DLR veranlasst, im Rahmen dieses Projekts für eine erhebliche Verbreiterung der Datenbasis zu sorgen.

3.3. Studiendesign und Studienablauf

Die fünfjährige DLR-Untersuchung bestand aus vier Studien im Schlaflabor des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln (Studienzeiträume: September bis November 1999, Mai bis Juli 2000, Februar bis April 2001, März bis Juni 2003) und aus zwei Feldstudien (Studienzeitraum September 2001 – November 2002), bei denen die Probanden in ihren eigenen vier Wänden in den fluglärmbelasteten Gebieten des Flughafens Köln/Bonn untersucht wurden.

Die **Laboruntersuchungen** bei 128 Personen fanden im DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln in jeweils 13 aufeinander folgenden Nächten statt. In der ersten Nacht

wurden die Probanden mit den Messmethoden vertraut gemacht, d.h. sie schliefen ohne Lärmeinwirkung, aber mit den angelegten Elektroden. Die zweite Labornacht war ebenfalls lärmfrei; sie diente als Basisnacht zum Vergleich mit den folgenden neun Nächten, in denen Fluggeräusche in unterschiedlicher Häufigkeit (4 bis 128 mal pro Nacht) und Lautstärke (Maximalpegel zwischen 45 dB(A) und 80 dB(A) am Ohr des Schläfers) eingespielt wurden. Dieses entsprach bei einem Hintergrundpegel von 30 dB(A) einem energieäquivalenten Dauerschallpegel (Mittelungspegel) zwischen 30 dB(A) und 54,5 dB(A) während einer acht Stunden dauernden Nacht. Die zwei abschließenden Nächte waren erneut lärmfrei und dienten zur Beobachtung eventuell auftretender Erholungseffekte auf Grund der Fluglärmbelastung in den vorangegangenen neun Lärmnächten. Die Bettruhezeit in allen Nächten wurde auf acht Stunden (23:00 Uhr bis 7:00 Uhr) festgelegt.

16 Probanden dienten als Kontrollgruppe, d.h. sie schliefen in 13 aufeinander folgenden Nächten im Labor, ohne mit Lärm beschallt zu werden. Die Laborstudien fanden im Doppelblindversuch statt, da weder Probanden noch die anwesenden DLR-Wissenschaftler in den jeweils 13 Untersuchungsnächten wussten, welche Fluggeräusche für welche Probanden eingespielt wurden.

Die **Feldstudien** wurden über jeweils neun Nächte bei 64 Personen zu Hause durchgeführt, die in den deutschlandweit mit am höchsten durch Nachtfluglärm belasteten Gebieten rund um den Köln-Bonner Flughafen wohnten. Die Untersuchungen fanden zwischen September 2001 und November 2002 statt. Die Zahl der untersuchten Nächte pro Versuchsperson wurde auf neun festgelegt, weil durch äußere Bedingungen die An- und Abflüge über Tages- und Nachtzeiten variieren, und durch eine Untersuchung mehrerer Nächte diese Variationen und ihre Wirkung mit erfasst werden konnten.

Während der Untersuchungen bei den Versuchspersonen zu Hause wurden alle Geräusche sowohl in zwei Meter Abstand vor dem Fenster als auch im Schlafzimmer am Ohr des Schläfers parallel und gleichzeitig mit den elektrophysiologischen Daten aufgezeichnet (s. Abschnitt 3.5), um auch hier eine ereigniskorrelierte Auswertung vornehmen zu können. Die Schlafzeiten waren im Feld weniger strikt vorgegeben als im Labor; die Probanden sollten allerdings mindestens zwischen Mitternacht und morgens um 6 Uhr Bettruhe halten.

In den Labor- und Feldstudien wurden identische akustische, physiologische und psychologische Methoden angewendet. Dadurch wurde ein direkter Vergleich der Ergebnisse ermöglicht.

3.4. Untersuchungsmethoden

Der Schlaf der Versuchspersonen wurde durch klassische, in der Schlafforschung und Schlafmedizin etablierte Methoden gemessen. Dazu gehört die Erfassung der Gehirnströme (Elektroenzephalogramm EEG), der Augenbewegungen (Elektrookulogramm EOG) und der Muskelanspannung (Elektromyogramm EMG). Diese Signale erlauben es, Aussagen über Schlafdauer, Schlafqualität (wie Tiefschlaf, Leichtschlaf und Traumschlaf) und Schlafstörungen (wie Aufwachreaktionen, Wechsel der Schlafstadien und Wachzeiten im Schlaf) zu machen.

Die Aktometrie (d.h. die Erfassung von Bewegungen z.B. am Unterarm) wurde und wird in vielen Untersuchungen benutzt, um über Bewegungen im Schlaf auf Schlafdauer und Schlafqualität Schlüsse ziehen zu können. Sie kann allerdings die klassische Polysomnografie (EEG, EOG, EMG) nicht ersetzen, mit der detaillierte Reaktionen diagnostiziert und bewertet werden können. In dieser Studie wurde das Aktometer zusätzlich zur Polysomnografie eingesetzt und kontinuierlich, d.h. über den gesamten Tag und die Nacht, von den Versuchspersonen getragen.

Die Fingerpulsamplitude und das Elektrokardiogramm (EKG) wurden zur Erfassung von vegetativen Veränderungen (Reaktionen) genutzt, die möglicherweise schon vor einer im Hirnstrombild sichtbaren Veränderung eintreten können.

Atembewegung und Luftstrom an Mund und Nase wurden gemessen, um beim Probanden eventuell nicht bekannte schlafbezogenen Atmungsstörungen zu detektieren.

Die Stresshormone Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol wurden aus dem nächtlichen Sammelurin bestimmt, um mögliche Veränderungen der Ausscheidungsraten infolge der nächtlichen Fluglärmbelastung diagnostizieren zu können.

Befragungen zur Ermüdung, Befindlichkeit und zur Lärmbelastung und Lärmbelästigung wurden regelmäßig abends und morgens erhoben, um eventuell durch verkürzten oder schlechteren Schlaf verursachte Beeinträchtigungen belegen zu können.

Computergestützte Leistungstests am Abend und Morgen wurden von den Probanden durchgeführt, um auch hier Beeinträchtigungen durch Schlafstörungen ermitteln zu können. Diese Tests beruhen auf eine Standardisierung, die durch die AGARD [3-1] vorgenommen wurde und sich auf die Hand-Auge-Koordination („unstable tracking task“), die Merkfähigkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit beziehen. Diese Tests wurden durch die Probanden vor der eigentlichen Versuchsreihe in 40 Trainingssitzungen intensiv geübt, damit Lerneffekte die Versuchsergebnisse nicht beeinflussten.

3.5. Akustik

Die im **Schlaflabor** applizierten Geräusche wurden mit Klasse-1-Schallpegelmessern bei Flughafenanwohnern des Flughafens Düsseldorf aufgezeichnet. Die Aufnahme verschiedener startender und landender Flugzeuge wurde in den Schlafzimmern vorgenommen. Dabei wurde das Mikrophon in der Nähe des Kopfkissens (sozusagen am Ohr des Schläfers) aufgestellt. Bei den Aufzeichnungen wurden zwei Fensterstellungen (geschlossen und gekippt) ausgewählt. Diese Randbedingungen wurden gewählt, um realistische Geräuschmuster, so wie sie im Bett vom Schlafenden erlebt werden, zu erzielen, da sich Außengeräusche durchaus erheblich von den im Inneren eines Hauses ankommenden Geräuschen unterscheiden. Insbesondere das Dämpfungsverhalten (stärkere Dämpfung von hohen Frequenzen, geringere Dämpfung von niedrigen Frequenzen) wurde dadurch berücksichtigt.

Jeder Schlafraum im Schlaflabor wurde vor Studienbeginn einzeln mit geeichten Schallpegelmessern akustisch vermessen. Auf diese Weise wurde garantiert, dass das aufgezeichnete und das wieder eingespielte Geräusch sich nicht unterschieden.

Zur Kontrolle der korrekten Wiedergabe wurde das Geräusch im Schlafraum während des Versuchs gleichzeitig mit den elektrophysiologischen Signalen aufgezeichnet. Die Ausgabe eines Triggersignals ermöglichte die ereigniskorrelierte Auswertung von akustischen und elektrophysiologischen Signale mit einer Auflösung von 125 Millisekunden, d.h. jeder elektrophysiologisch detektierten Reaktion im Schlaf (Aufwachreaktion, Schlafstadienwechsel, vegetatives Arousal, Drehen im Bett) konnte zugeordnet werden, ob sie durch ein Lärmereignis hervorgerufen wurde oder spontan (d.h. ohne erkennbare äußere Einwirkung) entstand.

In den **Feldstudien** wurde der Schalldruckpegel außen und im Schlafraum kontinuierlich aufgezeichnet. Das Außenmikrophon befand sich üblicherweise in 2 m Abstand vor dem Schlafzimmerfenster, zwei Innenmikrophone waren am Kopfende des Bettes der zu untersuchenden Person aufgebaut. Sobald ein voreingestellter Hintergrundpegel außen überschritten wurde, zeichnete der äußere Schallpegelmesser das gesamte Geräusch auf, d.h. nicht nur den Pegelwert. Gleichzeitig wurde ein zweiter Schallpegelmesser, der simultan dasselbe Geräusch innen aufzeichnete, über ein Triggersignal aktiviert. Hierdurch wurde ein Geräuschvergleich zwischen außen und innen ermöglicht. Durch die simultane Aufnahme von

Triggersignal und elektrophysiologischen Signalen wurde auch in der Feldstudie eine ereigniskorrelierte Auswertung mit einer Auflösung bis zu 125 ms ermöglicht. Ein dritter Schallpegelmesser zeichnete Geräusche innen dann auf, sobald ein voreingestellter Pegel im Schlafraum überschritten wurde. Damit wurden zusätzlich auch Geräusche identifiziert, die im Schlafraum erzeugt wurden.

In den insgesamt 2.240 vom DLR untersuchten Nächten wurden im Labor über 30.000 Lärmereignisse eingespielt, im Feld mehr als 15.000 Fluggeräusche gemessen. Diese konnten zu den aufgezeichneten elektrophysiologischen Körperreaktionen der schlafenden Probanden in direkte Beziehung gesetzt werden.

3.6. Probandenauswahl

Für die Studie wurden in einem mehrstufigen Auswahlverfahren als Versuchspersonen insgesamt 192 Freiwillige ausgesucht, die zwischen 18 und 65 Jahre alt waren, ihrem Alter entsprechend schlafgesund und normalhörend waren und sich eher durch Lärm und/oder Fluglärm belästigt fühlten.

Ziel der Studie war es, den Einfluss von nächtlichem Fluglärm auf den Schlaf zu bestimmen. Leidet die Versuchsperson jedoch gleichzeitig unter einer intrinsischen, d.h. nicht durch Umwelteinflüsse verursachten Schlafstörung, kann nicht mehr unterschieden werden, ob die am nächsten Tag beobachteten sekundären Schlafstörungen (Müdigkeitsgefühl, eingeschränkte Leistungsfähigkeit, etc.) durch den Fluglärm oder durch die intrinsische Schlafstörung selbst verursacht worden sind, zumal das Ausmaß der intrinsischen Schlafstörung in verschiedenen Nächten unsystematisch fluktuieren kann.

Häufige spontane Aufwachreaktionen, hervorgerufen durch eine intrinsische Schlafstörung, führen dazu, dass der Anteil lärminduzierter Aufwachreaktionen eher unterschätzt wird. Lärminduzierte Aufwachreaktionen sind solche, die allein auf den Fluglärm zurückgeführt werden können. Sie berechnen sich aus der Differenz "Aufwachreaktionen unter Einfluss von Fluglärm" minus "spontan auftretende Aufwachreaktionen" (s. Abschnitt 3.7.2.3.). Patienten mit einer intrinsischen Schlafstörung entwickeln häufig aufgrund der ständig gestörten Struktur des Schlafs einen erhöht Schlafdruck, weshalb sie erst auf lautere Fluggeräusche reagieren als schlafgesunde Versuchspersonen. Es steht außer Frage, dass Verkehrslärm für Patienten mit intrinsischer Schlafstörung eine zusätzliche Belastung darstellt. Dennoch würden Empfehlungen, die auf Untersuchungen an solchen Versuchspersonen beruhen, den Einfluss von nächtlichem Fluglärm auf den Schlaf systematisch unterschätzen, wären damit anti-konservativ und nicht im Sinne des Schutzes der betroffenen Bevölkerung. Aus diesem Grund wurden Probanden mit vermuteten intrinsischen Schlafstörungen ausgeschlossen.

Eine genaue Beschreibung des Auswahlverfahrens und der Stichprobe ist im Forschungsbericht DLR-FB 2004-07/D [3-2] zu finden.

3.7. Ergebnisse

Im Folgenden werden thematisch getrennt die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse findet sich im Forschungsbericht DLR-FB 2004-07/D [3-2].

3.7.1. Akustik (Feldstudien)

In den Feldstudien wurden im Durchschnitt pro untersuchter Nacht 41 Überflüge registriert. Sowohl außen als auch innen wurde hinsichtlich des beobachteten Maximalpegels $L_{AS,max}$ der Fluggeräusche eine recht breite Verteilung festgestellt (s. Abbildung 3-1). Das lag sowohl daran, dass der Abstand der Flugpfade und die Flughöhe von der Messstelle variierten, als

auch daran, dass die Dämpfung der Atmosphäre durch unterschiedliche Wetterbedingungen (z.B. Regen Nebel, Sommer- /Winternächte) veränderlich war.

Die durch Fluggeräusche erzeugten außen gemessenen Maximalpegel lagen zwischen 35 dB(A) und 87 dB(A), was einem mittleren Maximalpegel von 64 dB(A) entsprach. Am Ohr des Schläfers (innen) lagen die Werte zwischen 20 dB(A) und 73 dB(A), im Mittel bei 44 dB(A) (Abbildung 2). Der auf Fluggeräusche bezogene mittlere energieäquivalente Dauerschallpegel zwischen 0 Uhr und 6 Uhr betrug außen 53,9 dB(A) und am Ohr des Schläfers 36,2 dB(A). Abhängig von der Fensterstellung wurden mittlere Differenzen zwischen dem Außen- und Innenpegel von 28 dB(A) (geschlossene), 18 dB(A) (gekippte) und 13,5 dB(A) (vollständig geöffnete Fenster) gemessen.

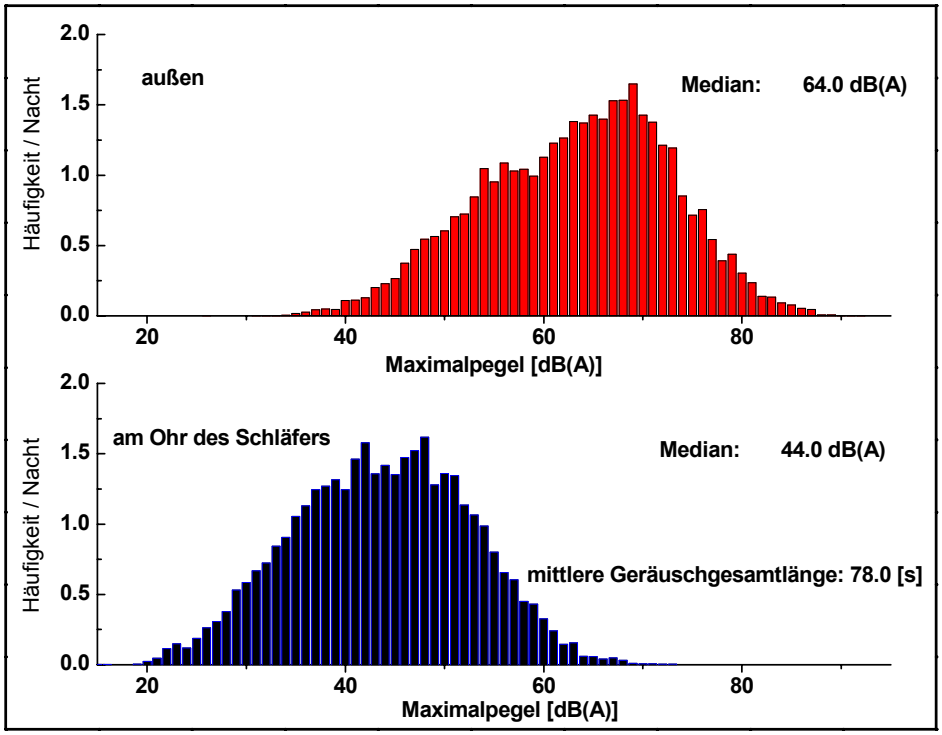


Abbildung 3-1: Differenzen zwischen außen und am Ohr des Schläfers gemessenen Schallpegeln.

3.7.2. Ergebnisse Schlafstörungen

An dieser Stelle können nur einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt werden. Ausführlichere Informationen sind im Forschungsbericht DLR-FB 2004-07/D [3-2] zu finden.

3.7.2.1. Einleitung

Durch die Aufzeichnung der Hirnströme (EEG), der Augenbewegungen (EOG) und des Anspannungszustandes der Kinnmuskulatur (EMG) kann der Schlaf in sechs verschiedene Stadien unterteilt werden. Neben dem Wachzustand unterscheidet man den leichten Schlaf (Schlafstadium S1 und S2), den Tiefschlaf (Schlafstadium S3 und S4, englisch *slow wave sleep* SWS) und den Traumschlaf (REM-Schlaf).

Nächtlicher Fluglärm kann zu einer Veränderung der Schlafstruktur führen. Der Tiefschlaf scheint neben dem REM-Schlaf besonders wichtig für die regenerative Funktion des Schlafs und für die Gedächtnis-Konsolidierung zu sein, wohingegen das Schlafstadium S1 und insbesondere der Wachzustand kaum bzw. nicht zu dieser Erholungsfunktion des Schlafes beitragen.

Fluglärm kann zu Störungen unmittelbar in der Nacht (primäre Schlafstörungen, z.B. Aufwachreaktionen) und am folgenden Tag (sekundäre Schlafstörungen, z.B. erhöhte Tagesmüdigkeit) führen. Gesundheitsstörungen aufgrund langfristiger Verkehrslärmexposition (tertiäre Schlafstörungen, z.B. erhöhtes Herzinfarktrisiko) werden kontrovers diskutiert (s. Abbildung 3-2).

Abbildung 3-2: Einteilung lärmbedingter Schlafstörungen.

In der vorliegenden Studie wurden nur akute, d.h. primäre und sekundäre Schlafstörungen untersucht. Aus diesem Grund können nur indirekte Aussagen über langfristige Gesundheitsstörungen in dem Sinne gemacht werden, dass mit fluglärmbedingten langfristigen Gesundheitsstörungen dann mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu rechnen ist, wenn fluglärminduzierte primäre und sekundäre Schlafstörungen verhindert bzw. stark eingeschränkt werden.

Folgende Ursachen erschweren den Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen Verkehrslärm und langfristigen Gesundheitsstörungen, der in erster Linie in epidemiologischen Studien untersucht werden kann:

- Sehr lange Induktionszeiten bis zum Auftreten der untersuchten Erkrankung (z.B. Herzinfarkt).
- Wechselnde Expositionen (Lärmdosis) über lange Zeiträume können nur ungenau erfasst werden, was zu möglichen Fehlklassifizierungen führt.
- Viele weitere Risikofaktoren führen zu den untersuchten Krankheitsbildern. Sind diese mit der Exposition assoziiert, handelt es sich um so genannte Confounder, die sorgfältig kontrolliert werden müssen, um Verzerrungen (Bias) zu vermeiden.
- Die erwarteten Effekte sind relativ gering und können deshalb nur mit sehr großen Stichproben ermittelt werden.

Epidemiologische Studien und Untersuchungen zu akuten Wirkungen des nächtlichen Fluglärms sind keine konkurrierenden Studienformen. Sie ergänzen sich sogar in dem Sinne, dass viele Stärken der einen Studienform die Schwächen der anderen sind und umgekehrt.

3.7.2.2. Fluglärmbedingte Veränderungen der Schlafstruktur

In der Laborstudie wurden die Schlafstadienanteile aller Lärmnächte, unabhängig von Anzahl und Maximalpegel der Fluggeräusche, intraindividuell mit denen der Basisnächte verglichen. Bei einer Gesamtschlafzeit von 7 Stunden und 24,5 Minuten war der Schlaf um 1,8 Minuten nicht signifikant reduziert. Es konnten jedoch Veränderungen in der Schlafstruktur beobachtet werden: Der Tiefschlaf war im Mittel um 4,1 Minuten insbesondere zugunsten der Schlaf-

stadienanteile von Wach und S1 (+2,3 Minuten) reduziert (s.Abbildung 3-3). Die Veränderungen der einzelnen Schlafstadienanteile waren jedoch jeweils nicht statistisch signifikant.

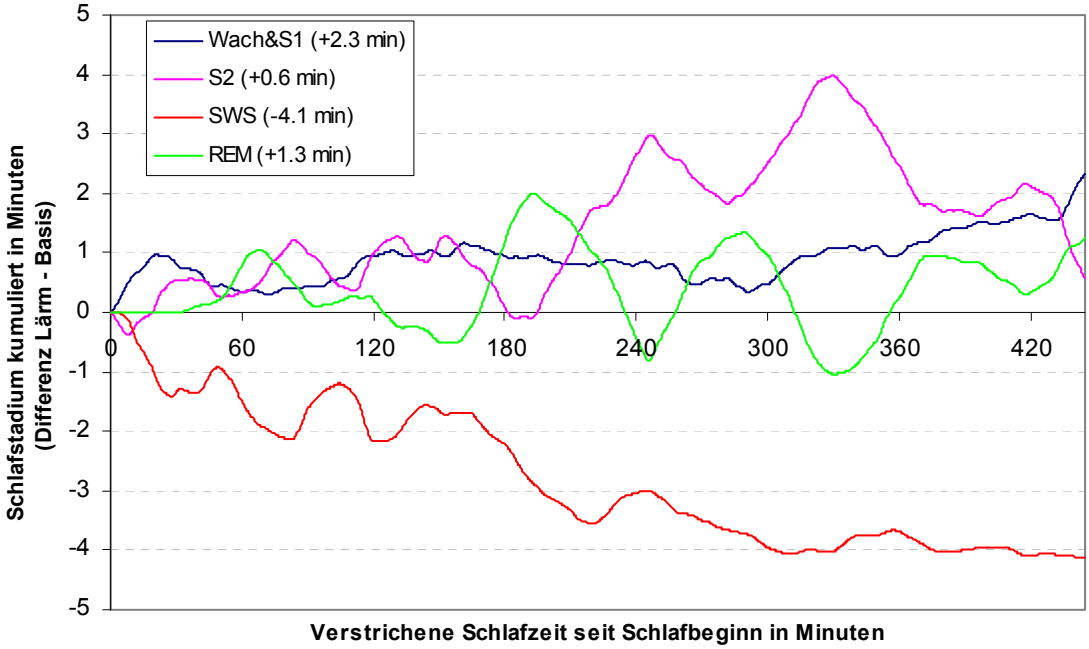


Abbildung 3-3: Veränderung der Schlafstadienanteile (mittlere Differenz zwischen Lärm- und Basisnacht) im Verlauf der Nacht in den Laborstudien.

Bei der Betrachtung von Veränderungen des Tiefschlafanteils in Abhängigkeit von Anzahl und Maximalpegel der Fluggeräusche konnte in 21 von 30 Fällen eine Reduktion beobachtet werden (erwartet bei keinem Einfluss von Nachtfluglärm: 15 Fälle). Die Veränderungen reichten von -18,0 Minuten bei 32 x 60 dB(A) bis zu +7,7 Minuten bei 4 x 55 dB(A) jeweils im Vergleich zur Basisnacht, wobei selbst diese hohen Veränderungen Bonferroni-korrigiert nicht signifikant waren.

Erhöhte Tiefschlafanteile in Nächten mit wenigen Geräuschen und/oder niedrigen Maximalpegeln deuteten darauf hin, dass die Kompensation eines eventuellen Tiefschlafdefizits aus vorausgehenden Nächten in diesen weniger belasteten Nächten möglich war.

In der Feldstudie existierte keine Basisnacht ohne Fluggeräusche, so dass hier nach Mediansplit jeweils die vier am stärksten belasteten Nächte mit den vier am schwächsten belasteten Nächten verglichen wurden. Die Veränderungen der Anteile der Schlafstadien variierten um +/- 4 Minuten um Null und waren jeweils nicht signifikant von Null verschieden (Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest für gepaarte Daten).

3.7.2.3. Ereigniskorrelierte Analyse lärminduzierter Aufwachreaktionen

Mit ereigniskorrelierter Auswertung ist eine Analyse gemeint, die zeitlich einen direkten Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Fluggeräusches und der Reaktion des beobachteten Menschen auf das Fluggeräusch herstellt. Durch die simultane Aufzeichnung der elektrophysiologischen und der akustischen Signale wird eine ereigniskorrelierte Auswertung überhaupt erst ermöglicht. Mit Hilfe eines Triggersignals wurde in den Labor- und Feldstudien eine ereigniskorrelierte Analyse mit einer Auflösung von 125 Millisekunden erzielt.

Als abhängige Variable wurde das Auftreten eines Wechsels in den Wachzustand oder das Schlafstadium S1 (hier und in allen folgenden Abbildungen abkürzend „Aufwachreaktionen“ genannt) gewählt, da das Schlafstadium S1 nicht zur regenerativen Funktion des Schlafs beizutragen scheint. Die unten dargestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen beruhen auf den

Ergebnissen einer logistischen Regression mit Zufallseffekten (*random effects logistic regression*).

Aufwachreaktionen werden unter Fluglärm vermehrt beobachtet, sie sind jedoch insofern unspezifisch, als dass sie auch während des durch Geräusche ungestörten Schlafes spontan auftreten. So wurden in der Laborstudie in den lärmfreien Basisnächten im Mittel 24 Aufwachreaktionen elektrophysiologisch beobachtet. Diese waren jedoch meist so kurz, dass sie vom Schläfer nicht wahrgenommen wurden. Wenn man im Zusammenhang mit einem Fluggeräusch eine Reaktion beobachtet, muss man sich also immer fragen, wie häufig diese auch ohne das Fluggeräusch, also spontan, aufgetreten wäre. In der Epidemiologie spricht man in diesem Zusammenhang von attributablen Risiken. Die Wahrscheinlichkeit einer durch das Geräusch induzierten Reaktion $P_{induziert}$ errechnet sich als:

$$P_{induziert} = P_{Fluggeräusch} - P_{spontan}$$

In Abbildung 3-4 werden die Ergebnisse einer logistischen Regression mit Zufallseffekten für die Labor- und Feldstudie hinsichtlich der beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Maximalpegel miteinander verglichen. Dargestellt sind fluglärminduzierte Wahrscheinlichkeiten, d.h. die Wahrscheinlichkeit spontan aufzuwachen wurde bereits von der unter Fluglärm beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeit subtrahiert.

Beide Modelle enthalten den Maximalpegel des Fluggeräuschs, die verstrichene Schlafzeit (SchlZeit) und das Schlafstadium, in dem sich der Schläfer vor Auftreten des Fluggeräuschs befand (StadVor), als erklärende Variablen.

Der Hintergrundpegel $L_{AS,eq(3)}$ in der Minute vor Auftreten eines Fluggeräuschs hatte in der Feldstudie einen signifikanten Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit. Dieser Einfluss war bei geringen Maximalpegeln des Fluggeräuschs größer als bei hohen Pegeln, d.h. es wurde eine Interaktion zwischen beiden Einflussgrößen festgestellt. Im Modell der Feldstudie ist deshalb zusätzlich zum Hintergrundpegel auch der Interaktionsterm zwischen Hintergrundpegel und Maximalpegel des Fluggeräuschs enthalten. Der Hintergrundpegel wurde mit konstant 27,1 dB(A) angenommen, was dem in der Feldstudie gefundenen Median entspricht. Im auf den Daten der Laborstudien beruhenden Modell ist zusätzlich die Variable $(L_{AS,max})^2$ enthalten. Aus präventivmedizinischen Gründen wurde angenommen, dass sich die Versuchsperson immer im empfindlichsten Schlafstadium S2 und in der Mitte der empfindlicheren zweiten Nachthälfte befand.

Man erkennt, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit im Labor deutlich nicht-linear anstieg (Abbildung 3-4). Bei einem Maximalpegel von 45 dB(A) wird eine Aufwachwahrscheinlichkeit von 6,3%, bei 80 dB(A) von 64,5% vorausgesagt. Eine Schwelle wurde im Labor oberhalb von 45 dB(A) nicht beobachtet (Geräusche mit Maximalpegeln kleiner als 45 dB(A) wurden im Labor nicht eingespielt).

Die Aufwachwahrscheinlichkeit im Feld nahm mit zunehmendem Maximalpegel deutlich weniger stark zu als im Labor. Maximalpegel von 73,2 dB(A) (Maximum) gingen mit einer Aufwachwahrscheinlichkeit von 9,8% einher (Labor: 47,2%). In der Feldstudie wurde mit 32,7 dB(A) ein Schwellenwert gefunden, unterhalb dessen nicht mehr mit fluglärminduzierten Aufwachreaktionen zu rechnen ist. Dieser Wert lag nur ca. 6 dB(A) über dem mit 27,1 dB(A) angenommenen Hintergrundpegel, was dafür spricht, dass die Sensitivität des Indikators "Aufwachreaktionen" ausreichend hoch war. Die Unterschiede zwischen Labor- und Feldstudie wurden zudem mit zunehmendem Maximalpegel ebenfalls größer.

einer nennenswerten Arbeit von Pearsons [3-3] als Ergebnis einer Meta-Analyse von Studien über die Wirkung von Verkehrsgeräuschen beschrieben. Die in der Arbeit beobachteten Reaktionswahrscheinlichkeiten lagen sogar noch unterhalb der in der vorliegenden Feldstudie gemessenen.

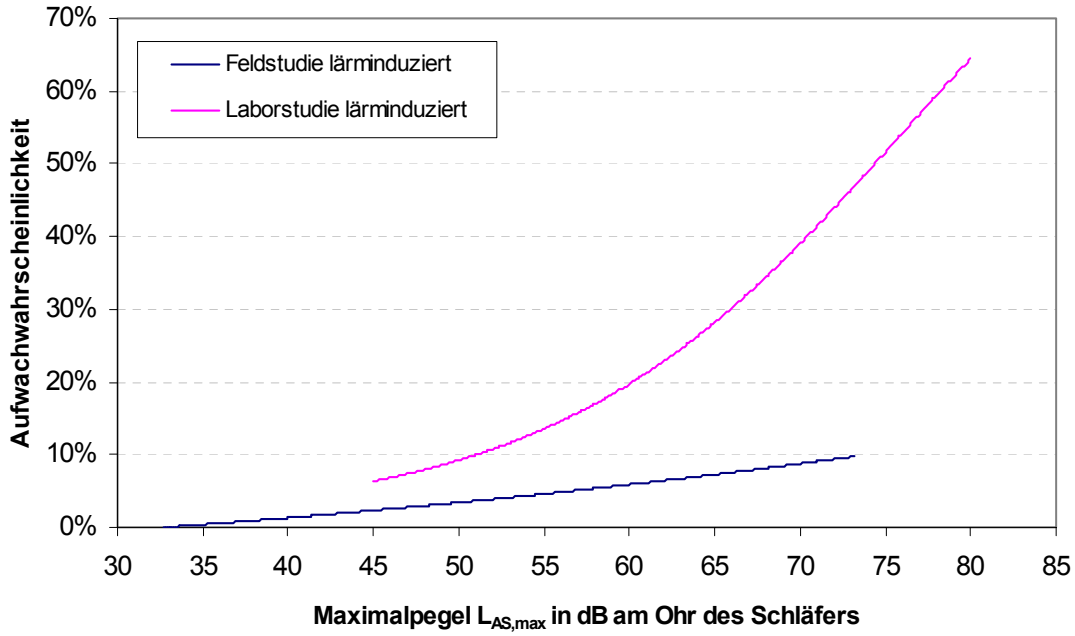


Abbildung 3-4: Vergleich der Dosis-Wirkungsbeziehungen (Labor – Feld). Beschreibung der Modelle (random effects logistic regression) im Text.

Die geringere Reaktionswahrscheinlichkeit im Feld im Vergleich zum Labor wurde 1995 in Eine mögliche Ursache für die im Feld beobachteten geringeren Reaktionswahrscheinlichkeiten ist die Tatsache, dass die Feldstudienteilnehmer in ihrer **vertrauten Umgebung**, zu der das eigene Bett gehört, untersucht wurden. So zeigten Hume und Whitehead [4] in einer Studie, in der Versuchspersonen zu Hause über Lautsprecher mit Verkehrsgeräuschen beschallt wurden, dass die Reaktionswahrscheinlichkeiten in der gewohnten Umgebung tatsächlich geringer ausfielen als aus Laborstudien bekannt. Die Aufwachwahrscheinlichkeiten zu Hause waren jedoch immer noch höher als die von Pearsons [3-3] berichteten, die sich auf Untersuchungen mit realen Verkehrsgeräuschen im Feld bezogen. Es scheint also nicht nur die vertraute Umgebung per se, sondern auch die Gewöhnung an das **spezifische Geräuschszenario** eine Rolle zu spielen.

3.7.2.4. Bewertung und Potential

Die Kombination von akustischen Prognosen mit den in der vorliegenden Studie gefundenen Dosis-Wirkungs-Beziehungen für elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen erlaubt es, für jeden Ort in der Umgebung eines Flughafens mit recht hoher Genauigkeit vorherzusagen, wie viel Prozent der Bevölkerung keinmal, genau einmal, genau zweimal usw. zusätzlich durch nächtlichen Fluglärm aufwachen.

Bisher werden ausschließlich akustische Kriterien (z.B. äquivalenter Dauerschallpegel, Anzahl von Lärmpegeln oberhalb einer Schwelle) zur Bewertung der nächtlichen Fluglärmbelastung herangezogen. Durch die Ergebnisse der DLR-Untersuchungen können zusätzlich Wirkungskriterien (z.B. die Wahrscheinlichkeit für eine, zwei usw. Aufwachreaktionen) in Abhängigkeit vom tatsächlichen Flugverkehrsaufkommen angegeben werden. Diese Gebiete unterscheiden sich qualitativ z.T. deutlich von den Zonen, die alleine auf akustischen Kriterien beruhen (s. Abbildung 3-5).

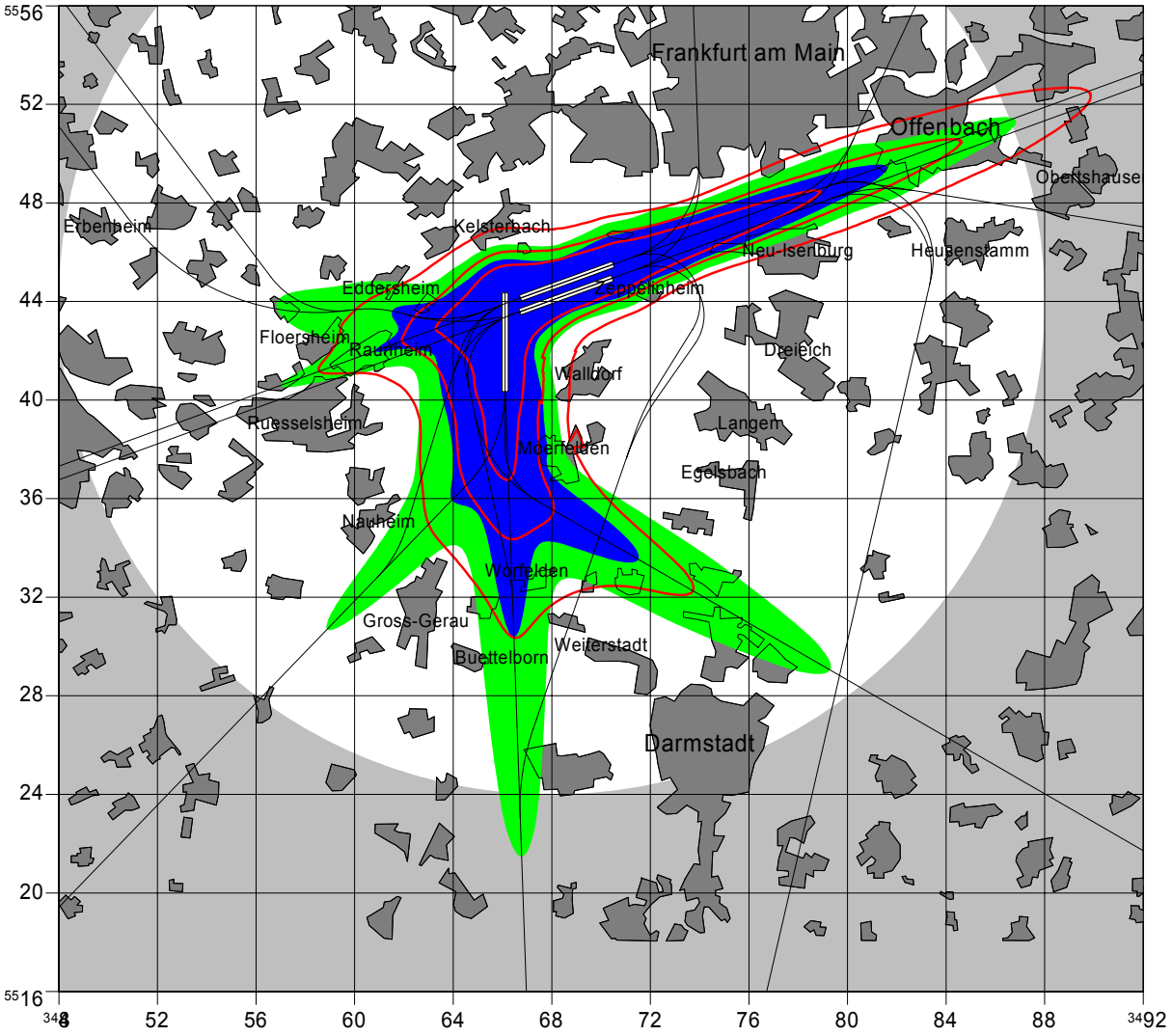


Abbildung 3-5: Vergleich von Gebieten am Frankfurter Flughafen, in denen ein $L_{eq(3)}$ von 55 dB(A) (blau) bzw. 50 dB(A) (grün) überschritten wird, mit Gebieten, außerhalb derer im Mittel mit weniger als 1 (äußerste Linie), 2 oder 3 (innerste Linie) Aufwachreaktionen zusätzlich durch Fluglärm zu rechnen ist.

3.7.3. Belästigung

Es finden sich keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Ermüdung (FAT), die Befindlichkeit (MDBF) sowie die Erholung und Beanspruchung (EBF).

Für die statistisch wichtigste psychologische Lärmwirkung - die Belästigung durch Lärm – wurden signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Labor- als auch Feldstudienerhebungen anhand von logistischen Regressionsanalysen mit Zufallseffekten (logistic regression with random effects) abgeleitet. Zur Generierung einer dichotomen abhängigen Belästigungsvariablen wurden die Kategorien 3 bis 5 der ursprünglich 5-stufigen Antwortskala zu einem Wert zusammengefasst (d.h. Vorliegen einer Belästigung durch Fluglärm), die Stufen 1 und 2 indizierten keine Belästigung. Da sich lediglich 20% aller Belästigungseinstufungen in den Laborstudien und nur 4% aller Einstufungen in den Felduntersuchungen auf die Stufen 4 und 5 verteilen, erfolgte keine Betrachtung der Bewertungen auf den oberen 25-30% der Skala, die nach dem so genannten Schultz-Kriterium [3-5] die Gruppe der „ziemlich“ belästigten Personen (highly annoyed) konstituieren. Eine Beschränkung auf diesen Anteil der Personen hat zudem den Nachteil, dass der (quantitativ ebenfalls bedeutende) Teil der Per-

sonen, deren Lärmbelästigung im mittleren Bereich der verwendeten Antwortskala liegt, ignoriert wird.

Da in der Literatur sowohl der $L_{AS,eq}$ [3-6] als auch der $L_{AS,max}$ zusammen mit der Anzahl an Fluglärmereignissen [3-7,-8] als valide physikalische Indikatoren zur Beschreibung der Fluglärmbelästigung angesehen werden, wurden für die Laborerhebungen jeweils zwei logistische Regressionsmodelle entwickelt. Für die Feldstudien wurde für die Anzahl an nächtlichen Flugereignissen und den $L_{AS,eq}$ je ein spezifisches Modell abgeleitet. In alle Modelle wurden fluglärmspezifische (eingestufte Gesundheitsschädlichkeit, Vermeidbarkeit und Notwendigkeit des Flugverkehrs, allgemeine Einstellung zum Flugverkehr, Gesundheitsgefährdung durch Fluglärm) und personale (Vorbelästigung durch Fluglärm, Lärmempfindlichkeit, Gewöhnung an Fluglärm, Alter, Geschlecht) Moderatoren integriert und auf Signifikanz geprüft.

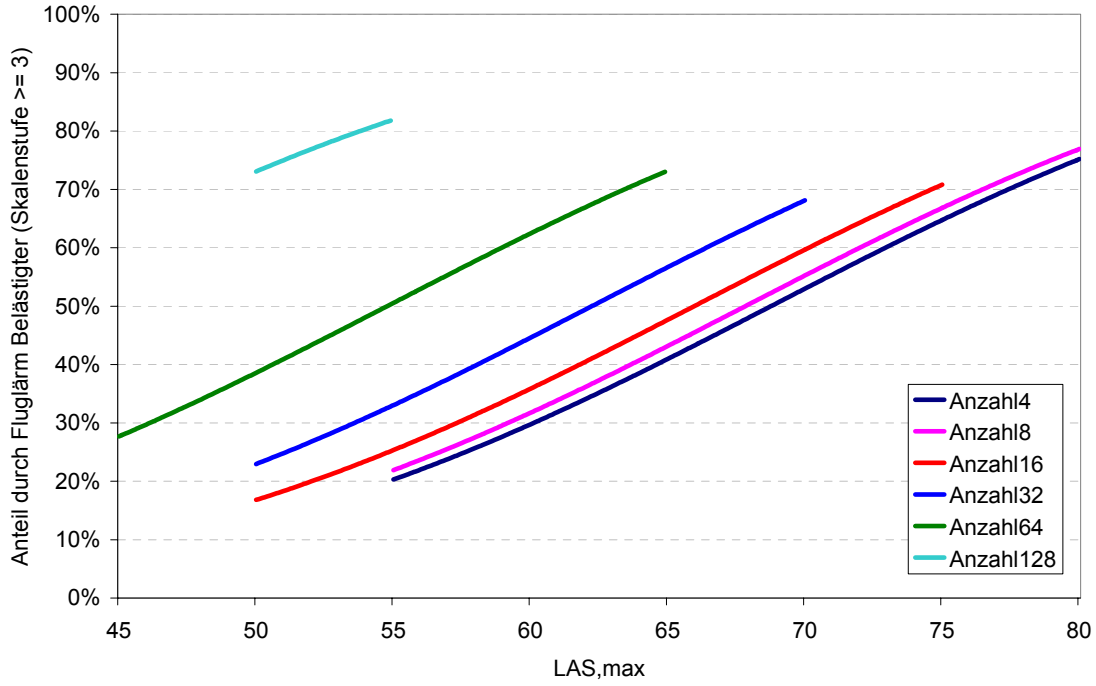


Abbildung 3-6: Durch Regressionsmodell L1 vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter (Skalenstufe 3 bis 5) in Abhängigkeit vom Maximalpegel $L_{AS,max}$ und der Anzahl an Flugereignissen.

In den laborspezifischen Regressionsmodellen L1 (Anzahl und $L_{AS,max}$) und L2 ($L_{AS,eq}$) erweisen sich das Geschlecht (vorhergesagter Anteil durch Fluglärm belästigter Personen bei Frauen höher), die Vorbelästigung durch Fluglärm (je vorbelästigter, desto höher der Anteil Fluglärmbelästigter) und die eingestufte Notwendigkeit des Flugverkehrs (je geringer die Notwendigkeit, desto höher der Anteil Belästigter) als signifikante psychologische Einflussgrößen. Nach der Schätzung von L1 haben sowohl der $L_{AS,max}$ als auch die Anzahl an Fluglärmereignissen einen signifikanten Einfluss auf die Fluglärmbelästigung (s. Abbildung 3-6). Das Ausmaß an Belästigung wächst linear sowohl mit Ansteigen des $L_{AS,max}$ als auch der Häufigkeit von Ereignissen, was mit Befunden aus bisherigen Feldstudien zur Fluglärmwirkung übereinstimmt. 128 mal 55 dB(A) führen zum höchsten Anteil prognostizierter Lärmbelästigter von über 80%. Im Gegensatz zu vorangegangenen Felduntersuchungen steigt der Teil der Belästigten auch bei wenigen Flugbewegungen (< 16 Überflüge pro Nacht) mit zunehmendem $L_{AS,max}$ signifikant an. L2 prognostiziert einen signifikanten Zuwachs an Belästigten mit steigendem $L_{AS,eq}$ (15% bei 30,6 dB(A) bis 70% bei 46,6 dB(A)) (ohne Abbildung).

In die feldspezifischen Regressionsmodellen F1 (Anzahl) und F2 ($L_{AS,eq}$) fließen die Gewöhnung an Fluglärm (je geringer die Gewöhnung, desto höher der Anteil Fluglärmbelästigter) und zusätzlich in F1 das Alter (je älter, desto höher der Anteil Belästigter) als signifikante psychologische Moderatoren ein. Nach F1 hat die Anzahl an Flugbewegungen eine signifikante Wirkung auf die Fluglärmbelästigung (ohne Abbildung). Der Anteil an belästigten Personen nimmt mit dem Anstieg der Häufigkeit von Ereignissen zu. 128 Fluglärmsituationen pro Nacht bedingen das höchste Ausmaß an Lärmbelästigten (etwa 55%). F2 sagt eine signifikante Zunahme des Teils an Belästigten mit ansteigendem $L_{AS,eq}$ vorher, der sein Maximum bei 47,3 dB(A) mit etwa 30% erreicht (Abbildung 3-7).

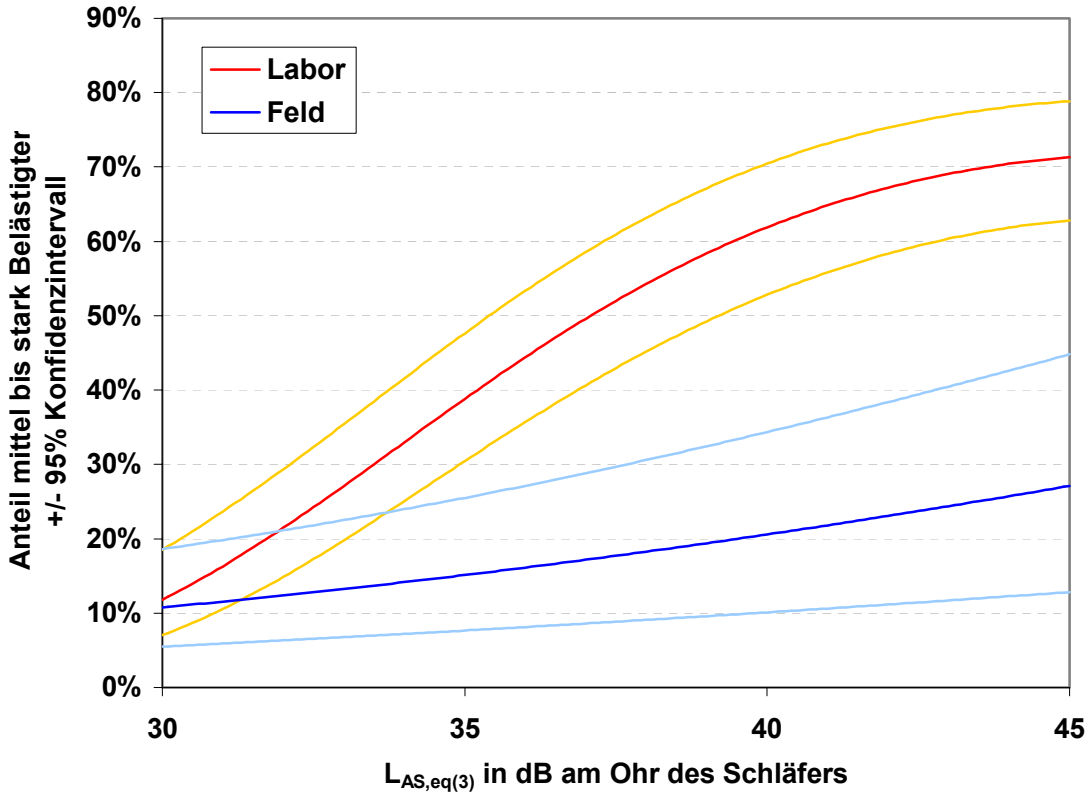


Abbildung 3-7: Durch labor- und feldspezifische Regressionsmodelle L2 und F2 vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter (Skalenstufe 3 bis 5) in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{AS,eq}$.

Vergleicht man die aus den Regressionsmodellen abgeleiteten labor- und feldspezifischen Dosis-Wirkungs-Kurven für gemeinsame Wertebereiche des $L_{AS,eq}$ zeigt sich, dass die aus L2 vorhergesagte Kurve deutlich über der Feldkurve liegt (bis zu 40%-Punkte Unterschied) (Abbildung 3-7). Bei einem $L_{AS,eq}$ von 30,6 dB(A) ist der prognostizierte Teil Fluglärmbelästigter in beiden Untersuchungssettings noch annähernd gleich (12% bis 15%). Bei 47,3 dB(A) sind es 30% im Feld gegenüber über 70% im Labor, d.h., dass die Probanden im Schlaflabor durch den nächtlichen Fluglärm signifikant belästigter als bei den Felduntersuchungen zu Hause waren. Es muss jedoch beachtet werden, dass in die Labor- und Feldmodelle unterschiedliche psychologische Einflussgrößen integriert wurden (Labor: Geschlecht, Vorbelästigung durch Fluglärm, eingestufte Notwendigkeit des Flugverkehrs; Feld: Gewöhnung an Fluglärm).

3.7.4. Stresshormonausscheidung

Die Exkretionsrate von Cortisol im nächtlichen Sammelurin war unter Laborbedingungen von Lärm beeinflusst. Mit signifikantem Trend (nach Jonckheere) war sie vom Maximalpegel und

der Anzahl der Fluggeräusche abhängig. Auch mit zunehmendem Dauerschallpegel $L_{AS,eq}$ ergab sich ein entsprechender Trend (s. Abbildung 3-8). Zugleich ergab sich jedoch auch ein Trend zunehmender Cortisolausscheidung mit der Anzahl der im Labor gemessenen Tage bei Versuchspersonen ohne jeglichen Fluglärm. Solche Trends waren im Feld nicht zu beobachten.

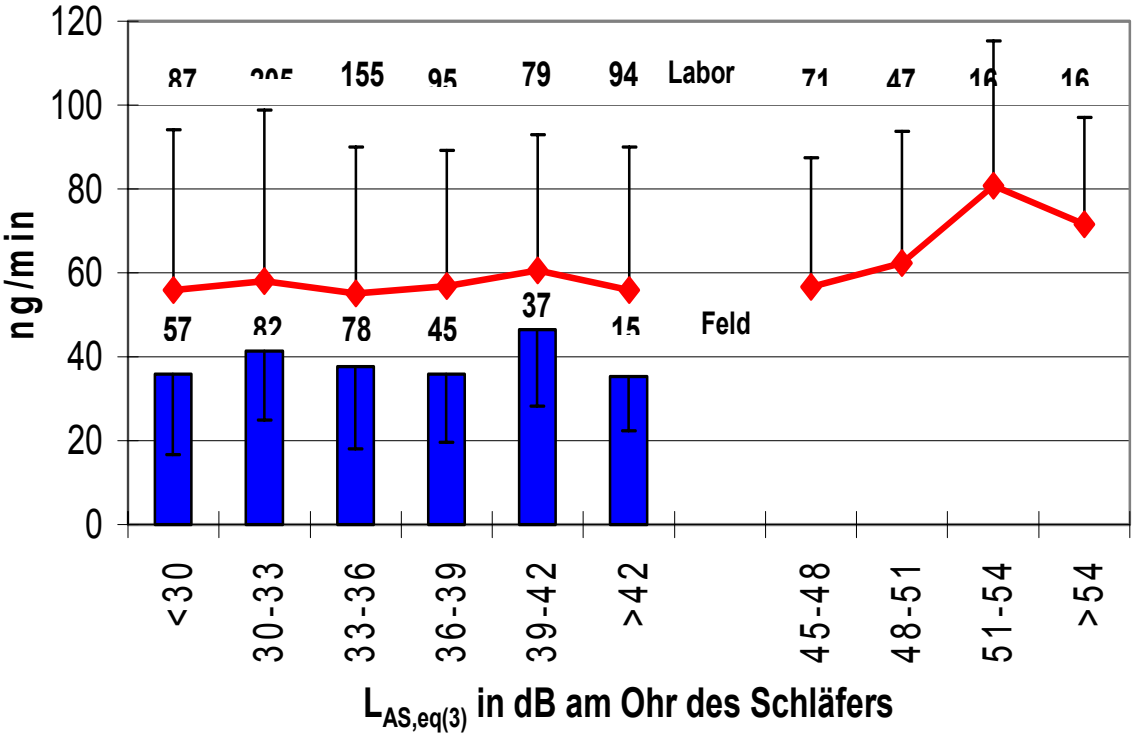


Abbildung 3-8: Mittlere Cortisolausscheidung (± Standardabweichung) im nächtlichen Sammelurin unter Laborbedingungen (n = 88, nur Experimentalgruppen mit identischer Bestimmungsmethode, Linie) und im Feld (n = 64, Balken) bei Einteilung des mittleren äquivalenten Dauerschallpegels in 3 dB breite Klassen.

Die Noradrenalinausscheidung im nächtlichen Sammelurin war statistisch betrachtet konstant und von Lärm nicht beeinflusst. Es gab keine Veränderungen in Abhängigkeit von äquivalentem Dauerschallpegel, Maximalpegel oder Anzahl der Ereignisse. Es gab auch keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen unter Laborbedingungen und im Feldversuch. Ebenso war die Fortdauer der Untersuchungen (Anzahl der untersuchten Nächte) ohne Bedeutung hinsichtlich eines möglichen Lärmeinflusses auf die Exkretion von Noradrenalin.

Die Adrenalinsekretion im nächtlichen Sammelurin zeigte unter Fluglärm keine Änderung. Sie blieb auf äußerst niedrigem Niveau. Unter Laborbedingungen lag die Adrenalinkonzentration in mehr als 2/3 aller Urinproben unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze von 1 ng/ml, im Feld in rund der Hälfte der Urinproben. Es ergaben sich keine statistisch fassbaren Sekretionsraten, die sich von denen ohne Fluglärm unterschieden.

3.7.5. Leistung

Bezüglich der am Morgen gemessenen Leistungsvariablen konnten in den bisherigen statistischen Analysen keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen ermittelt werden. Die bisherigen Ergebnisse der Leistungsmessungen zeigen keine relevante Beeinträchtigung unter

nächtlichem Lärmeinfluss. Die in Abschnitt 3.7.2.2. beschriebenen Ergebnisse zum Schlaf zeigen eine Verminderung der Gesamt-Schlafzeit von durchschnittlich weniger als 2 min. Von daher ist es kaum zu erwarten, dass eine signifikante Beeinträchtigung der Leistung eintritt. Hingegen wurden relevante Einflüsse in den hier betrachteten Leistungsparametern in einer vergleichenden Studie zum partiellen Schlafentzug erst bei einem Schlafentzug von jeweils drei Stunden in mehreren aufeinander folgenden Nächten gefunden.

Da die hier präsentierten Mittelwerte die Leistung aller Probanden umfassen, könnte es sinnvoll sein, eine Differenzierung hinsichtlich der Teilnehmer vorzunehmen, die von ihrem Schlafverhalten her besonders empfindlich auf die nächtliche Lärmbeeinflussung reagierten und daher möglicherweise auch eine Beeinträchtigung ihrer Tagesleistungsfähigkeit aufweisen; ebenso ist noch zu analysieren, ob die Zahl der lärminduzierten Aufwachreaktionen besonders in dieser Gruppe einen überproportional höheren Einfluss ausübte als die reine Verminderung der Schlafzeit.

3.8. Einschränkungen und Vorteile der Studie

Alle Ergebnisse beziehen sich auf die durch die Studie vorgegebenen Randbedingungen (z.B. Alter und Gesundheitszustand der Versuchspersonen). Auch wenn die Repräsentativität durch diese Randbedingungen eingeschränkt ist, so ist sie trotzdem deutlich höher als die Repräsentativität der Studien, die bisher auf diesem Gebiet mit vergleichbarem Ansatz durchgeführt wurden.

In der vorliegenden Studie wurden nur akute, d.h. primäre und sekundäre Schlafstörungen untersucht. Diese Studie ist keine epidemiologische Studie, die notwendig wäre, um langfristige Auswirkungen von (Flug-) Lärm auf die Gesundheit zu untersuchen. Aus diesem Grund können nur indirekte Aussagen über langfristige Gesundheitsstörungen in dem Sinne gemacht werden, dass mit langfristigen Gesundheitsstörungen dann mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu rechnen ist, wenn fluglärminduzierte primäre und sekundäre Schlafstörungen verhindert bzw. stark eingeschränkt werden.

Im Vergleich zu anderen, bisher veröffentlichten Studien zu dem Thema hat das DLR eine sehr große Stichprobe in Bezug auf die Zahl der Probanden und Probandennächte verwendet; zudem wurden Personen zwischen 18 und 65 Jahren untersucht, während die meisten bisherigen Studien an jungen Probanden (im Alter zwischen 18 und 35 Jahren) durchgeführt wurden.

Durch die Auswahl der Versuchspersonen in der vorliegenden Studie (z.B. eher lärmbelästigte als in der allgemeinen Bevölkerung) und die konservativ angelegte Analysetechnik (z.B. Annahme des Schlafstadiums, aus dem man am leichtesten aufwacht) wurde ein präventivmedizinischer Ansatz gewählt, der fluglärmbedingte Aufwachwahrscheinlichkeiten im Sinne der betroffenen Bevölkerung eher etwas überschätzt als unterschätzt.

Durch interindividuellen Vergleich (zwischen Probanden, die nicht beschallt wurden und denen, bei denen Fluglärm appliziert wurde) und durch intraindividuellen Vergleich (Nächte ohne und mit Lärm bei denselben Versuchspersonen) unterscheidet sich die vorliegende Untersuchung von den meisten bisherigen Laborstudien.

In den Labor- und Feldstudien wurden dieselben hohen methodischen, apparativen und analytischen Verfahren angewendet.

Die gleichzeitige Aufzeichnung von akustischen und elektrophysiologischen Parametern ermöglichte eine ereigniskorrelierte Auswertung der Daten. So konnte Ursache (Fluglärmereignis) und Wirkung (physiologische Reaktion) in direkten Zusammenhang gestellt werden. Diese Methodik erlaubte die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen für fluglärmbedingte physiologische und psychologische Reaktionen unter Labor- und Feldbedingungen. Aus den Dosis-Wirkungs-Beziehungen wurde ein Vorhersagemodell für fluglärmbedingte Auf-

wachreaktionen entwickelt. Ähnliches lässt sich für andere physiologische Funktionen entwickeln.

Aus dem Vorhersagemodell und akustischen Prognosen lassen sich Kriterien für fluglärmbedingte physiologische Reaktionen entwickeln.

3.9. Zusammenfassung

Im Rahmen des HGF/DLR-Projekts „Leiser Flugverkehr“ wurde bei 192 schlafgesunden Versuchspersonen im Alter zwischen 18 und 65 Jahren in 2.240 Nächten in Labor- und Feldstudien die Wirkung von Nachtfluglärm auf den Schlaf (durch Polysomnografie), auf die Stresshormonausscheidung (durch die Bestimmung von Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol aus dem nächtlichen Sammelurin), auf die Leistung (abendliche und morgendliche Durchführung von Computer-Leistungstests) und auf die Belästigung, Ermüdung, Befindlichkeit und Erholung und Beanspruchung (durch subjektive Einschätzungen) untersucht. Aufwachreaktionen auf Fluglärmereignisse wurden durch die simultane Aufzeichnung von elektrophysiologischen und akustischen Signalen erfasst.

In den Feldstudien (im Bereich des Köln-Bonner Flughafens) wurden durchschnittlich 41 Überflüge pro untersuchter Nacht registriert. Die durch Fluggeräusche erzeugten außen gemessenen Maximalpegel lagen zwischen 35 dB(A) und 87 dB(A), was einem mittleren Maximalpegel von 64 dB(A) entsprach. Innen lagen die Werte zwischen 20 dB(A) und 73 dB(A), im Mittel bei 44 dB(A). Der auf Fluggeräusche bezogene mittlere energieäquivalente Dauerschallpegel zwischen 0 Uhr und 6 Uhr betrug außen 53,9 dB(A) und am Ohr des Schläfers 36,2 dB(A). Abhängig von der Fensterstellung wurden mittlere Differenzen zwischen dem Außen- und Innenpegel von 28 dB(A) (geschlossene), 18 dB(A) (gekippte) und 13,5 dB(A) (vollständig geöffnete Fenster) gemessen.

Bezüglich der am Morgen gemessenen Leistungsvariablen konnten in den bisherigen statistischen Analysen keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen ermittelt werden.

Es finden sich keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die subjektive Einschätzung der Ermüdung, der Befindlichkeit und der Erholung und Beanspruchung. Dagegen ergab sich eine signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen dem energieäquivalenten Dauerschallpegel der Fluggeräusche und dem Anteil der Versuchspersonen, der sich mittel bis stark durch Fluglärm belästigt fühlten. Der Belästigungsgrad im Feld war erheblich geringer als im Labor, auch bei Zugrundelegung vergleichbarer äquivalenter Dauerschallpegel.

Bei den Ausscheidungsraten der Stresshormone Adrenalin und Noradrenalin wurde keine signifikante Veränderung ermittelt. Bei Cortisol wurde nur unter Laborbedingungen ein signifikanter Trend mit wachsenden Lärmpegeln gefunden, dagegen unter Feldbedingungen keine Veränderungen diagnostiziert.

Im Labor wurde bei dem Vergleich aller Lärmnächte mit den lärmfreien Basisnächten eine statistisch nicht signifikante Verkürzung der Schlafzeit um etwa zwei Minuten festgestellt. Gleichzeitig wurden Veränderungen in der Schlafstruktur ermittelt: Der Tiefschlafanteil war zugunsten oberflächlicher Schlafstadien verkürzt, jedoch statistisch nicht signifikant.

Erste Aufwachreaktionen wurden im Feld oberhalb einer Schwelle von etwa 33 dB(A), gemessen am Ohr des Schläfers, beobachtet. Eine Schwelle wurde im Labor oberhalb von 45 dB(A) nicht beobachtet (Geräusche mit Maximalpegeln kleiner als 45 dB(A) wurden im Labor nicht eingespielt). Alle nachgewiesenen Effekte waren unter Feldbedingungen erheblich geringer als unter Laborbedingungen.

Dosis-Wirkungs-Beziehungen für fluglärmbedingte, elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen wurden erstmalig mit einer sehr hohen Präzision entwickelt. Die Basis dafür wurde im Labor durch über 30.000 eingespielte Lärmereignisse, im Feld durch mehr als 15.000 gemessene Fluggeräusche erzielt. Aufgrund dieser hohen Fallzahl konnten präzise

Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem Maximalpegel eines Fluggeräuschs und dem Auftreten von Aufwachreaktionen bestimmt werden.

Unter Zugrundelegung dieser sehr großen Datenbasis wurde ein Prognosemodell entwickelt, welches für gegebene akustische Verhältnisse an einem Flughafen Vorhersagen über die Wahrscheinlichkeit von fluglärmbedingten Aufwachreaktionen machen kann. Die Kombination von akustischen Prognosen mit den in der vorliegenden Studie gefundenen Dosis-Wirkungs-Beziehungen für elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen erlaubt es, für jeden Ort in der Umgebung eines Flughafens mit recht hoher Genauigkeit vorherzusagen, wie viel Prozent der Bevölkerung keinmal, genau einmal, genau zweimal usw. zusätzlich durch nächtlichen Fluglärm wahrscheinlich aufwachen. Bisher werden ausschließlich akustische Kriterien (z.B. äquivalenter Dauerschallpegel, Anzahl von Lärmpegeln oberhalb einer Schwelle) zur Bewertung der nächtlichen Fluglärmbelastung herangezogen. Durch die Ergebnisse der DLR-Untersuchungen können zusätzlich Wirkungskriterien (z.B. die Wahrscheinlichkeit für eine, zwei, usw. Aufwachreaktionen) in Abhängigkeit vom tatsächlichen Flugverkehrsaufkommen angegeben werden.

3.10. Literatur

[3-1] AGARD-AG-308 (1989): ISBN 92-835-0510-7, Human Performance Assessment Methods

[3-2] Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gerlich, A., Luks, N., Maaß, H., Mawet, L., Müller, E.-W., Müller, U., Plath, G., Quehl, J., Samel, A., Schulze, M., Vejvoda, M., Wenzel, J. (2004): Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung. DLR-FB 2004-07/D

[3-3] Pearsons, K., Barber, D., Tabachnick, B.G., Fidell, S. (1995): Predicting noise-induced sleep disturbance. Journal of the Acoustical Society of America 97(1): 331-338

[3-4] Hume, K., Whitehead, C. (2003): Sleep disturbance due to introduced aircraft noise. In: de Jong, R. G., Houtgast, T., Franssen, E. A. M., and Hofman, W. (Editors): Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem. 199-200

[3-5] Schultz, T.J. (1978): Synthesis of social surveys on noise annoyance. Journal of the Acoustical Society of America 64(2): 377-405

[3-6] Aasvang G.M., Engdahl B. (1999): Aircraft noise in recreational areas: A quasi-experimental field study on individual annoyance responses and dose-response relationships. Noise Control Eng.J. 47(4): 158-162

[3-7] Bjorkman, M., Ahrlin, U., Rylander, R. (1992): Aircraft noise annoyance and average versus maximum noise levels. Archives of Environmental Health 47(5): 326-329

[3-8] Sato, T., Yano, T., Björkman, M., Rylander, R. (1999): Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level. Journal of Sound and Vibration 223: 775-784

4. Minderung des Triebwerkslärms

Arbeitspaket 2A: ***Dr. Ulf Michel, E-Mail:*** ulf.michel@dlr.de
DLR-Institut für Antriebstechnik,
Abteilung Turbulenzforschung, Berlin

4.1. Zielsetzung

Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung technischer Maßnahmen, die zu einer erheblichen Minderung der Triebwerksgeräusche führen. Es handelt sich dabei um die Erarbeitung der Voraussetzungen für eine deutliche Erhöhung des Nebenstromverhältnisses und um die aktive Lärmminderung. Daneben wurden auch neuartige Verfahren entwickelt, mit denen die Triebwerksindustrie bei experimentellen Geräuschuntersuchungen an Triebwerkskomponenten oder gesamten Triebwerken unterstützt wurde.

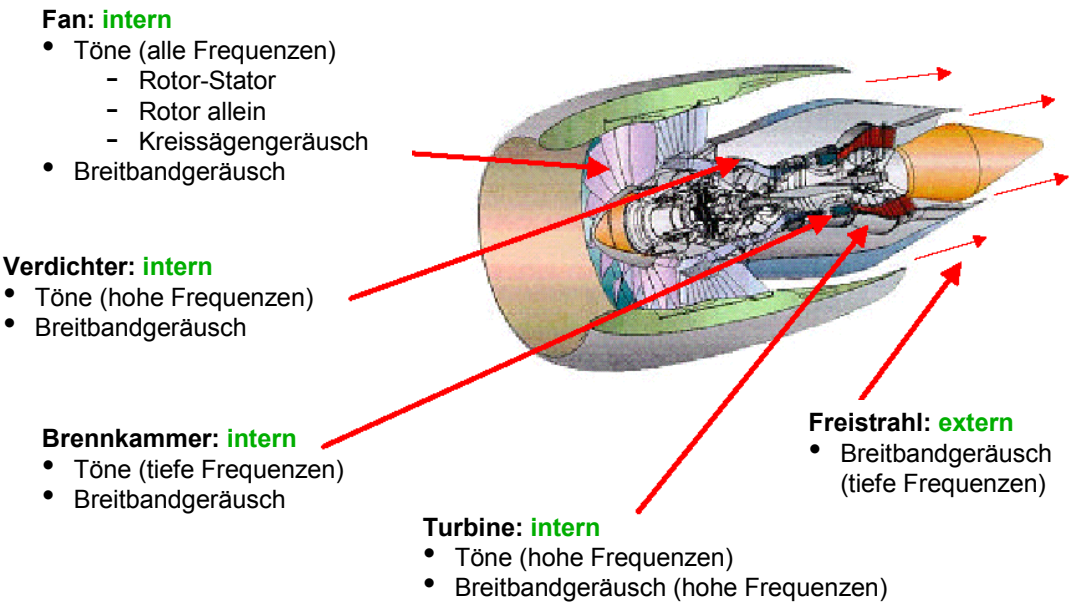


Abbildung 4-1: Die wichtigsten Schallquellen an einem Flugtriebwerk.

Das triebwerksbezogene Lärmminderungspotenzial beim Start liegt im Vergleich zu den meisten im Jahre 2000 eingesetzten Triebwerken bei 12 dB (EPNL), das im Verlauf von zwanzig Jahren erreicht werden kann, allerdings nur mit einem neuen Technologiesprung, vergleichbar der Einführung der Nebenstromtriebwerke in den 60er Jahren und des Einsatzes von Nebenstromtriebwerken mit hohen Nebenstromverhältnissen in den 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Grundvoraussetzung für leisere Triebwerke ist eine erhebliche Verringerung des Strahllärms durch Erhöhung des Nebenstromverhältnisses von heute typischerweise 6-8 auf zukünftig 12-15, die auch zu einer besseren Steigfähigkeit der Flugzeuge führt. Dies erfordert die Entwicklung völlig neuer Triebwerke und erhebliche Änderungen bei den Flugzeugen. Die technologische Herausforderung ist die Senkung der Lärmemission aller internen Geräuschquellen des Triebwerks (Fan, Verdichter, Brennkammer, Turbine, siehe Abb.4-1) um etwa 10 dB, weil nur dann das oben erwähnte Potential realisiert werden kann. Am schwierigsten ist die Lärmminderung des Fans, weil aus Gewichtsgründen und wegen des zunehmenden aerodynamischen Widerstands die Triebwerksgondel nicht beliebig vergrößert werden kann. Die anderen internen Lärmquellen befinden sich im Kern-

triebwerk, das wegen seiner geringeren Größe leichter mit passiven Lärmminderungsmaßnahmen versehen werden kann, etwa für den Brennkammer-, Turbinen- und Verdichterlärm.

Es gibt allerdings auch nachrüstbare Maßnahmen zur Reduktion des Freistrahllärms. Besonders aussichtsreich, da mit nur geringen Schubverlusten verbunden, ist der Einsatz von gezackten Düsen. Im Rahmen des Projektes ergab sich die Möglichkeit, eine solche Düse für einen Airbus A319 der Lufthansa auszulegen und zu testen. Die Düse wurde vom DLR ohne vorherige Modellversuche in Zusammenarbeit mit Lufthansa Technik entworfen, von Lufthansa Technik in Hamburg gebaut und zur Zulassung eingereicht. Das Ergebnis der Umbauten ist in Abbildung 4-2 zu sehen. Bei Frequenzen bis zu 1000 Hz wurde im Flugtest eine Lärmminderung um bis zu 1 dB ermittelt. Das Potential dieser Modifikation liegt bei bis zu 3 dB, wenn auch die im Bild weiter rechts sichtbare Nebenstromdüse modifiziert wird.

Abbildung 4-2: Gezackte Düse an einem Airbus A319 der Lufthansa.

Langfristig sind aber nur Maßnahmen sinnvoll, die den Strahllärm erheblich stärker reduzieren, nämlich die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses. Die Arbeiten im Projekt beschäftigten sich vor allem mit dem dann wichtigsten Problem, der Reduktion des Fanlärms. Dieser wird von zwei Anteilen dominiert, dem Wechselwirkungslärm zwischen Rotor und Stator und dem allein durch den Rotor erzeugten Lärm.

Der Rotor-Stator-Wechselwirkungslärm ist überwiegend eine Folge der turbulenten Nachlaufdellen der Rotorschaufeln und wird auch durch das Zahlenverhältnis von Rotor- und Statorschaufeln beeinflusst, das neben weiteren Parametern die innerhalb der Gondel ausbreitungsfähigen akustischen Kanalmoden bestimmt. Der Wechselwirkungsmechanismus erzeugt Töne bei Vielfachen der Blattfolgefrequenz, aber auch Breitbandgeräusche.

Das allein vom Rotor erzeugte Geräusch setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen. Der erste ist Folge einer ungleichförmigen Zuströmung zum Rotor und besteht aus Tönen und Breitbandgeräuschen. Er tritt bei jeder Strömungsmaschine auf. Der zweite Anteil wird abgestrahlt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit an den Blattspitzen größer als die Schallgeschwindigkeit ist. Typische Umfangsgeschwindigkeiten heutiger Triebwerkfans beim Start liegen bei 440 m/s, zu der sich noch die Anströmgeschwindigkeit im Triebwerkseinlauf von etwa 180 m/s vektoriell addiert. Ein wesentlicher Teil dieses Rotorgeräusches wird in Form eines sehr unangenehmen Kreissägengeräusches (Buzz-saw noise) abgestrahlt. Dieser Teil des Rotorlärms kann durch Schaufelgestaltung, z.B. geschweifte Schaufelvorderkanten, in

begrenztem Maße reduziert werden. Eine erhebliche Lärmminderung dieser Geräuschkomponente gibt es aber nur, wenn die Relativgeschwindigkeit an den Rotorspitzen etwa auf Schallgeschwindigkeit reduziert wird. Ein Teil der Arbeiten im Rahmen des Projektes konzentrierte sich deshalb auf den Entwurf eines solchen Fans und die Bereitstellung der für die Prognose der Schallabstrahlung erforderlichen Rechenverfahren.

Der Entwurf der Turbomaschinenkomponenten basiert heute weitgehend auf stationären Rechenverfahren. Mit der Verfügbarkeit instationärer numerischer Verfahren, wie dem vom DLR entwickelten Verfahren TRACE, ergab sich die Möglichkeit, nicht nur die aerodynamischen Eigenschaften, sondern auch die Schallemission eines Rotors schon im Stadium des aerodynamischen Entwurfs zu optimieren.

Weiteres Reduktionspotential verspricht die aktive Lärmminderung. Hierbei werden Lautsprecher über Regelketten so angesteuert, dass der Schallpegel an so genannten Fehlermikrofonen minimiert wird. In Flugzeugkabinen, vor allem von Propellerflugzeugen, wird dieses Verfahren bereits erfolgreich eingesetzt. Die aktive Lärmminderung von Triebwerksaußenlärm ist allerdings ungleich schwieriger, da die Fehlermikrofone nicht im Schallfernfeld angebracht werden können.

Die Geräuschemission der internen Schallquellen Brennkammer, Verdichter und Turbine können nur in begrenztem Umfang durch lärmarmen Entwurf reduziert werden. Die großen, bei zukünftigen Triebwerken erforderlichen Geräuschpegelminderungen lassen sich nur mit über breite Frequenzbereiche wirksamen Schalldämpfern in den Strömungskanälen vor und hinter dem Triebwerk erreichen. Auf diesem Gebiet sind auch aktive Lösungen denkbar, die im Reiseflug abgeschaltet werden.

Die Forschungsziele dieses Arbeitspaketes waren:

1. Erarbeitung von Konstruktionsvorschlägen zur Senkung des Fanlärms durch Verringerung der Umfangsgeschwindigkeit und lärmoptimalen Schaufelentwurf um 6 dB.
2. Erarbeitung von Konstruktionsvorschlägen zur Verminderung des Turbomaschinenlärms durch aktive Lärmminderung um 5 dB.
3. Verfahren für lärmoptimalen Entwurf.
4. Verbesserung der Methoden zur Schallfeldanalyse an Triebwerken.

4.2. Verringerung des Fanlärms durch lärmoptimalen Entwurf

Der von einem Fan abgestrahlte Lärm kann durch konstruktive Veränderungen an den Rotoren und Statoren gesenkt werden. Dies wurde durch Berechnung des instationären Strömungsfeldes in einer kompletten Fanstufe mit dem Rechenverfahren TRACE des DLR, einer Modalentwicklung des akustischen Nahfelds und der daraus abgeschätzten Fernfeldemission demonstriert.

4.2.1. Validierung des Rechenverfahrens mit analytischen Lösungen:

In einem ersten Schritt wurde untersucht, unter welchen Voraussetzungen das Verfahren TRACE die Schallausbreitung genügend genau beschreibt. Es zeigte sich, dass für eine gute Approximation etwa 40 Gitterpunkte pro Wellenlänge erforderlich sind. Diese Forderung führt bei der zweifachen Blattfolgefrequenz von etwa 4000 bis 5000 Hz bei modernen Triebwerken zu Punktdichten in der Größenordnung von 500 pro Meter. Damit ist es so gut wie unmöglich, eine komplette Stufe mit heutigen Rechnern dreidimensional zu rechnen.

Aus diesem Grunde wurde das Verfahren TRACE zunächst mit der Methode der versetzt periodischen Ränder erweitert. Damit wurde es möglich, die instationäre Strömung in der gesamten Fanstufe mit der Lösung für nur einen Schaufelkanal in Rotor und Stator zu be-

rechnen. Beispielsweise muss im Fall des in Bild 1 gezeigten Triebwerks nur einer von 26 Rotorkanälen und nur einer von 58 Statorkanälen berechnet werden, wodurch sich die Rechenzeiten erheblich verringern. Sie sind aber immer noch so lang, dass eine solche Rechnung nur in einer Forschungsumgebung möglich ist. Es ist absehbar, dass die Rechenleistung der in 10 Jahren verfügbaren Rechner ausreichen wird, um die Methode routinemäßig für den Fanentwurf einzusetzen.

Eine weitere Verbesserung von TRACE war nötig, um die sehr viel größeren Ansprüche akustischer Rechnungen an die Reflexionsfreiheit der Ränder des Rechengebietes zu erfüllen. Die Randbedingungen des Verfahrens wurden deshalb verfeinert und stromauf und stromab zusätzlich Pufferzonen angesetzt, in denen die aus dem Rechengebiet austretenden Schallwellen gedämpft wurden.

4.2.2. Einsatz des Verfahrens zur Berechnung der Schallemission einer Fanstufe:

Mit dem so weiterentwickelten Verfahren wurde die instationäre Strömung und die tonale Schallabstrahlung eines Modellfans (siehe Abbildung 4-3) berechnet, für den von Rolls-Royce (im Rahmen des EU-Projektes TurboNoiseCFD) experimentelle Daten zur Validierung zur Verfügung gestellt wurden.

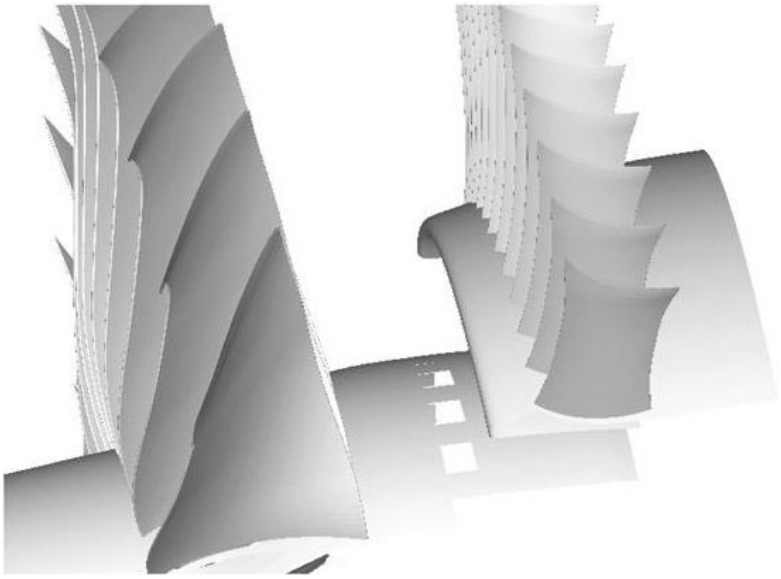


Abbildung 4-3: Beispiel für einen heutigen Triebwerksfan, der im Rahmen des Projektes berechnet wurde. Links ist der Rotor und rechts der Stator zu sehen.

Das Ergebnis einer Strömungsrechnung ist in Bild 4-4 zu sehen, wo die Nachläufe hinter den im Bild links liegenden Rotorschaufeln dargestellt sind, die auf die rechts liegenden Statorschaufeln treffen und dabei die Rotor-Stator-Interaktionstöne erzeugen.

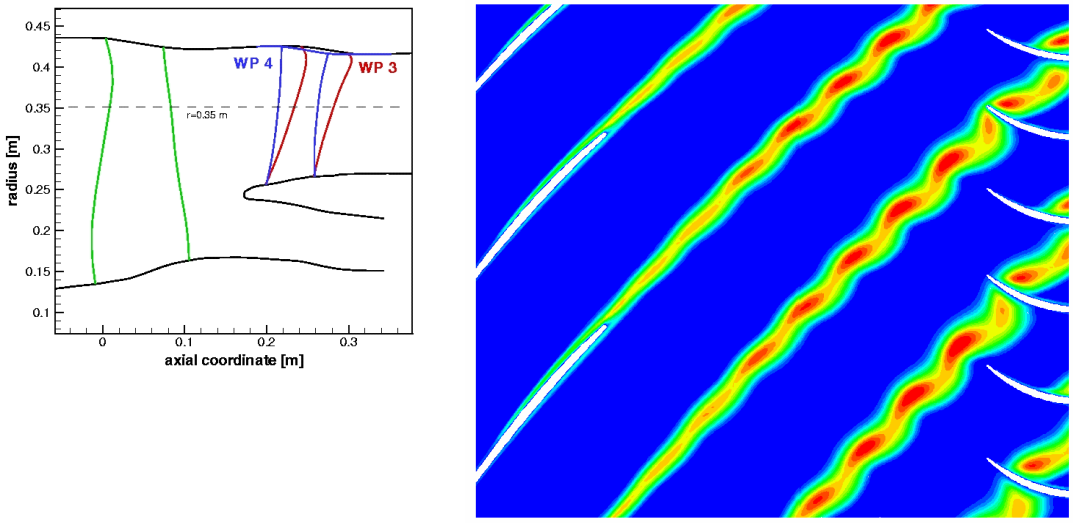
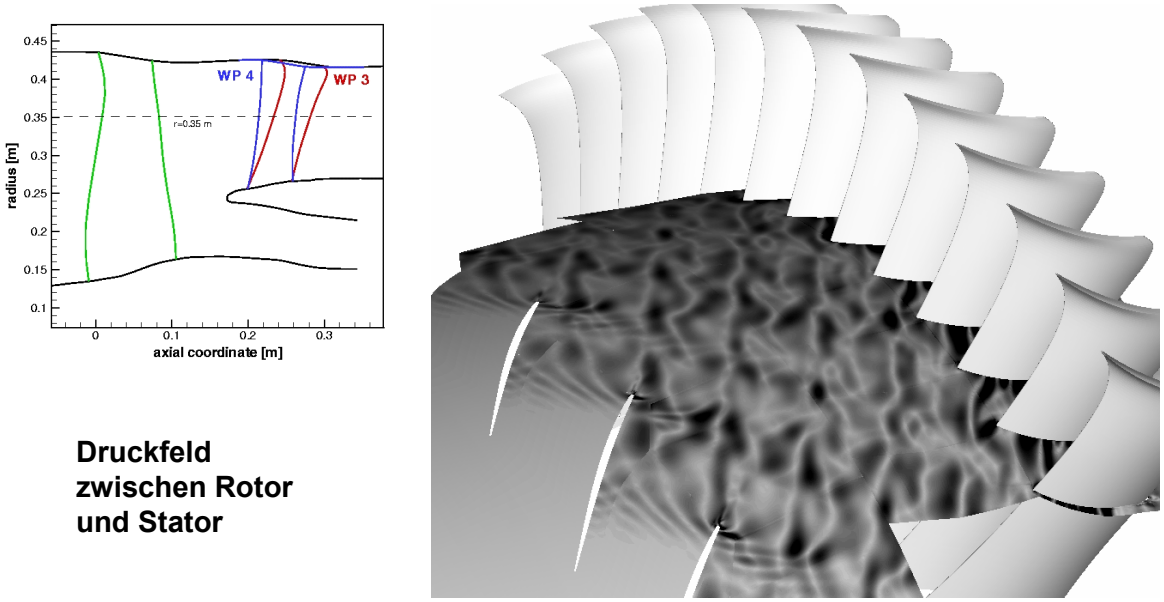


Abbildung 4-4: **Nachläufe hinter den links liegenden Rotorschaufeln, die beim Auftreffen auf die rechts liegenden Statorschaufeln die wichtigen Rotor-Stator-Interaktionsgeräusche erzeugen. Die dabei entstehenden Töne sind die lästigste Geräuschkomponente heutiger Flugzeugtriebwerke**



Druckfeld zwischen Rotor und Stator

Abbildung 4-5: **Berechnetes Druckfeld zwischen Rotor- und Stator, das sich von den Statoren ausgehend stromauf ausbreitet und sich nur schwach entgegen der schallnahen Strömung in den Schaufelkanälen des Rotors ausbreiten kann. Der größte Geräuschanteil wird daher nach hinten abgestrahlt.**

4.2.3. Berechnung der Schallemission ins Fernfeld

Die Schallausbreitung stromab in das Fernfeld wurde mit analytischen Methoden berechnet. Die Schallleistung lässt sich über eine Entwicklung des berechneten instationären Druckfeldes in der in Bild 4-6 gezeigten Kopplungsebene in akustische Radialmoden ermitteln. Im Bild sichtbar ist außerdem das instationäre Druckfeld, das mit einem von einem Forschungspartner (TU Eindhoven) entwickelten Rechenprogramm berechnet wurde. Auch die Schallabstrahlung entgegen der Strömungsrichtung nach vorn kann so behandelt werden.

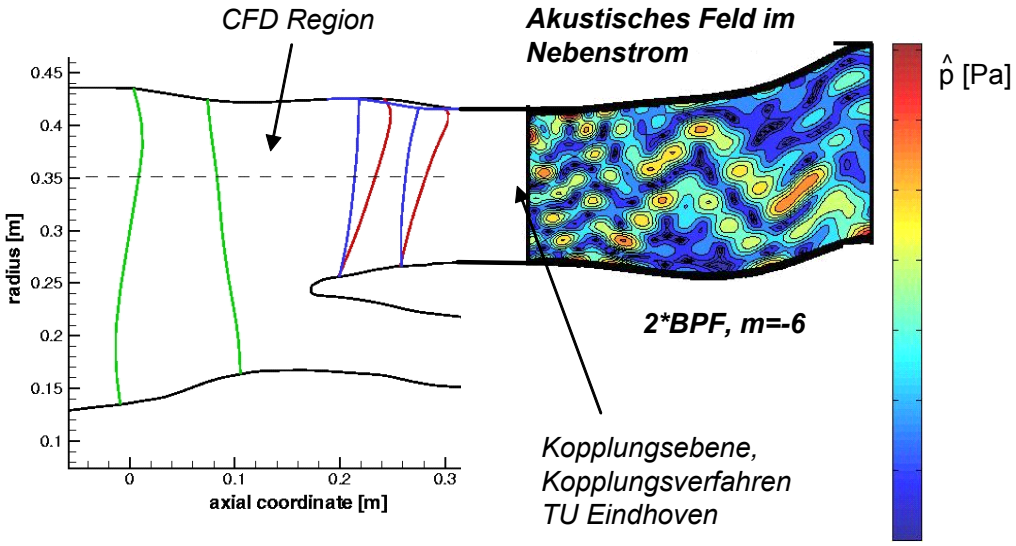


Abbildung 4-6: Das Schallfeld stromab einer Kopplungsebene wird mit dafür besonders geeigneten Verfahren berechnet. Die Schallleistung kann direkt aus dem instationären Druckschwankungsfeld in der Kopplungsebene bestimmt werden.

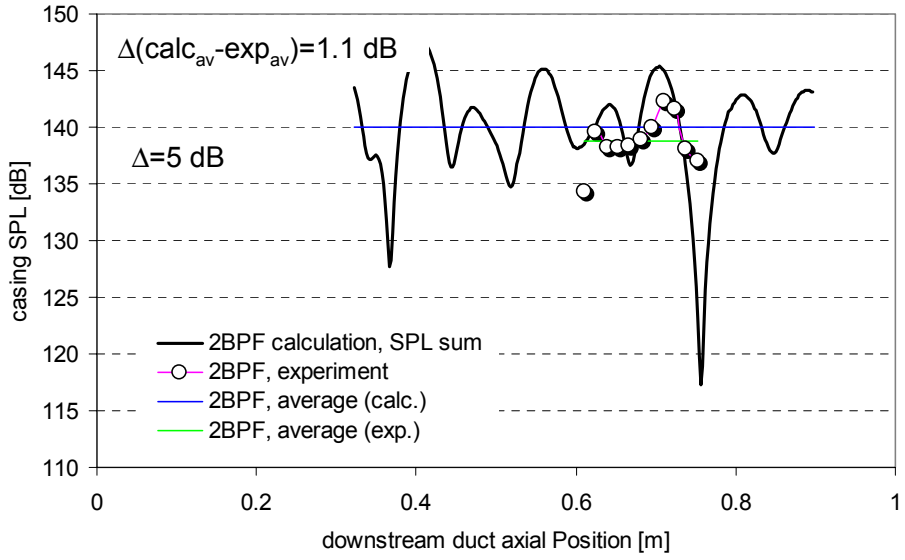


Abbildung 4-7: Vergleich des berechneten mit den gemessenen Schalldrücken.

4.2.4. Validierung des Verfahrens mit Prüfstandsdaten eines modernen Fans

Es wurde das instationäre Strömungsfeld in einer gesamten Fanstufe berechnet und mit experimentellen Daten verglichen, die auf den Oberflächen der Statorschaufeln und an der Kanalwand stromab des Stators gemessen wurden. Fangeometrie und experimentelle Daten wurden von Rolls-Royce zur Verfügung gestellt. Die in Bild 4-7 gezeigte Übereinstimmung der akustischen Daten ist sehr gut, wenn man noch beachtet, dass die gemessenen Werte durch Reflektionen vom Ende des Bypasskanals kontaminiert sind.

4.2.5. Reduzierung der Schallabstrahlung durch aeroakustische Optimierung der Schaufelprofile

Mit dem validierten Verfahren wurde gezeigt, dass sich die tonale Schallemission durch Neigung der Statorschaufeln (siehe Bild 4-8) um 3 dB reduzieren lässt. Das Ergebnis der Rechnung ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Die Schallleistung der Mode m=-6 sinkt durch Neigung des Stators, dagegen steigt die Leistung der Mode m=52. Nach Summierung beider Moden bleibt eine deutlich Minderung der Schallleistung von etwa 3 dB übrig.

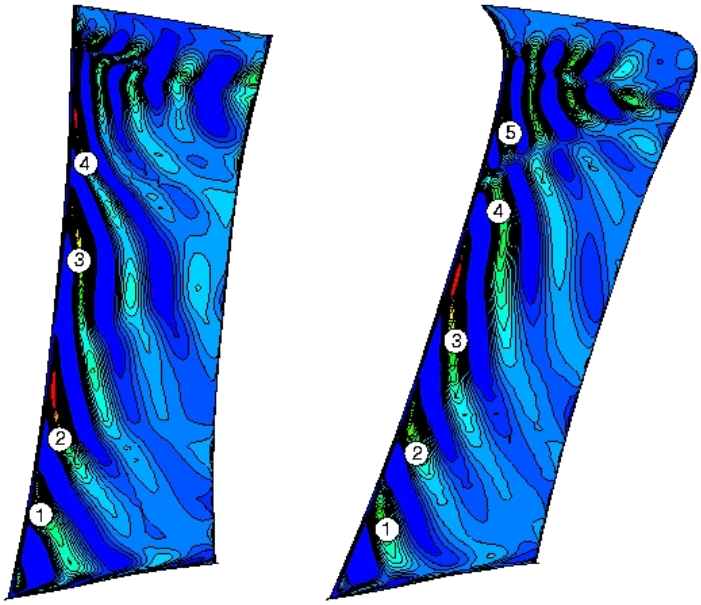


Abbildung 4-8: Untersuchung des Lärmminderungspotentials durch Ersatz eines geraden Stators (links) durch einen in Strömungsrichtung geneigten Stator.

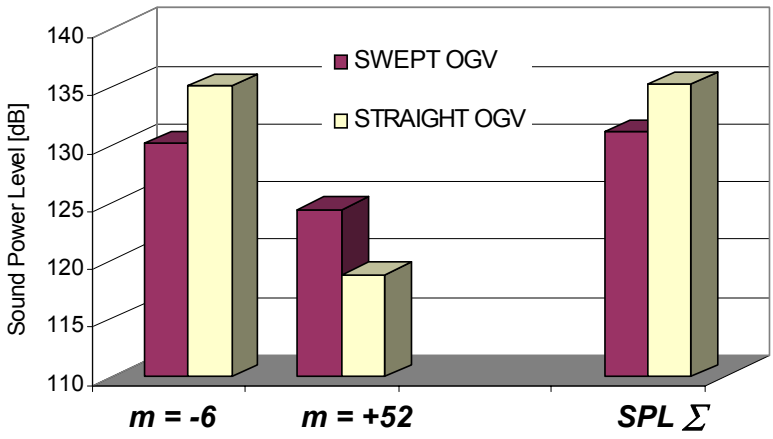


Abbildung 4-9: Berechnete Schallleistungen einzelner Azimutalmoden eines geraden und eines geneigten Stators. Die Schallleistung der Mode M=-6 sinkt durch Neigung des Stators, die Leistung der Mode m=52 steigt dagegen. Nach Summierung bleibt eine deutlich Minderung der Schallleistung von etwa 3 dB übrig.

4.2.6. Reduzierung der Schallabstrahlung durch Vergrößerung des Nebenstromverhältnisses

Es wurde ein Fan für ein Nebenstromverhältnis von 12 ausgelegt, bei dem die Blattspitzen beim Abflug nach dem Start des Flugzeugs mit einer Machzahl von etwa 1 angeströmt werden (siehe Bild 4-10). Ein solcher Fan ist vermutlich nur dann wirtschaftlich zu betreiben, wenn er über ein Getriebe angetrieben wird (Getriebefan). Dieses Vorhaben wurde mit Unterstützung von Partnern im europäischen Projekt SILENCE(R) durchgeführt. Die Schallleistung des Fans war am Ende der Projektlaufzeit noch nicht bekannt. Es werden erheblich niedrigere Lärmpegel als bei dem in 4-3 zeigten Fan erwartet.

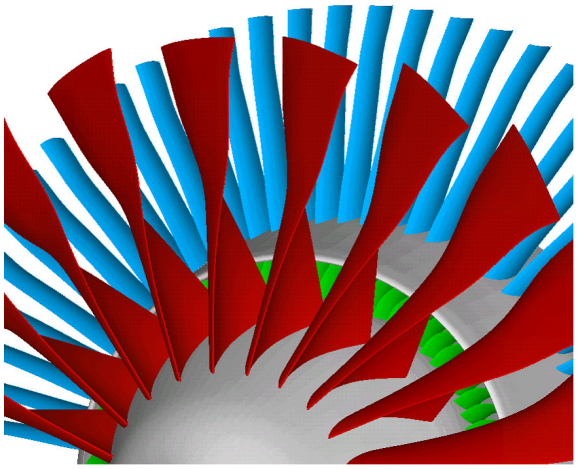


Abbildung 4-10: Leiser Fan, dessen Schaufelspitzen während des Abflugs mit Unterschallgeschwindigkeit angeströmt werden.

4.3. Aktive Lärmminderung

Der Einsatz von Gegenschall ist ein weiteres verfolgtes Konzept zur Lärmminderung. Das Verfahren der aktiven Lärmminderung durch Gegenschall ist nicht neu, die Anwendung auf das Flugtriebwerk mit seinen hoch komplizierten Schallfeldern ist aber besonders schwierig.

Bei der aktiven Lärmminderung bei Strömungsmaschinen geht es um die Erzeugung eines gegenphasigen Schallfeldes in den Strömungskanälen, um das von der Turbomaschine erzeugte primäre Schallfeld möglichst weitgehend auszulöschen. Das sich aus der Überlagerung von Schall und Gegenschall ergebende Schallfeld wird mit einem Satz Mikrofonen („Fehlermikrofone“) vermessen. Ein Regler berechnet in Echtzeit die erforderlichen Lautsprechersignale. Je komplizierter das auszulöschende primäre Schallfeld ist, desto mehr Fehlermikrofone und Lautsprecher werden benötigt, und desto höher werden die Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Reglers. Das Prinzip des Verfahrens ist in Bild 4-11 skizziert.

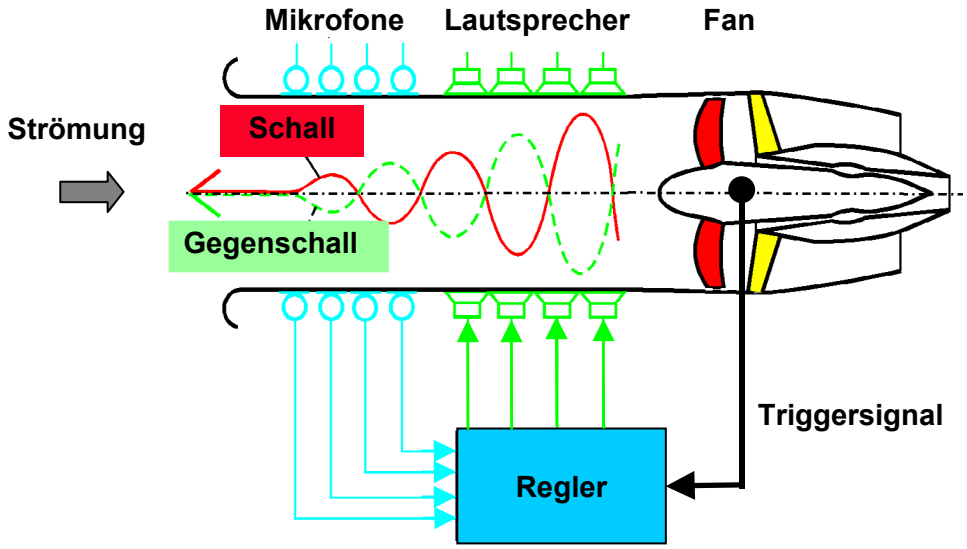


Abbildung 4-11: Erläuterung des Prinzips der aktiven Lärmminderung im Einlauf eines Flugtriebwerks.

Im Rahmen des Projektes wurden drei verschiedene Strategien verfolgt, den Gegenschall zu erzeugen.

1. Konventionelles Regelungsverfahren mit Minimierung der Schalldrücke an allen Fehlermikrofonen
2. Modales Regelungsverfahren zur Unterdrückung nur von einzelnen dominierenden Moden
3. Ersatz der Lautsprecher durch strömungserregten Gegenschall.

4.3.1. Aktive Lärmminderung durch konventionelle Regelung:

Ein Prinzipexperiment zur aktiven Lärmminderung in einem Flugtriebwerk wurde gemeinsam mit MTU und EADS Corporate Research Center Germany im Zuströmkanal des CRISP-1m-Modells durchgeführt. Der Versuchsaufbau mit 32 Lautsprechern (4 Ringe á 8), 32 wandbündigen "Fehlermikrofonen“ und 96 wandbündigen Messpositionen zur Schallfeldanalyse ist in Abbildung 4-12 gezeigt. Man erkennt an der großen Zahl der Lautsprecher und Fehlermikrofone, dass der Aufwand zur Erzeugung von Gegenschall in einem Flugtriebwerk erheblich ist, weil das Schallfeld sehr kompliziert ist.

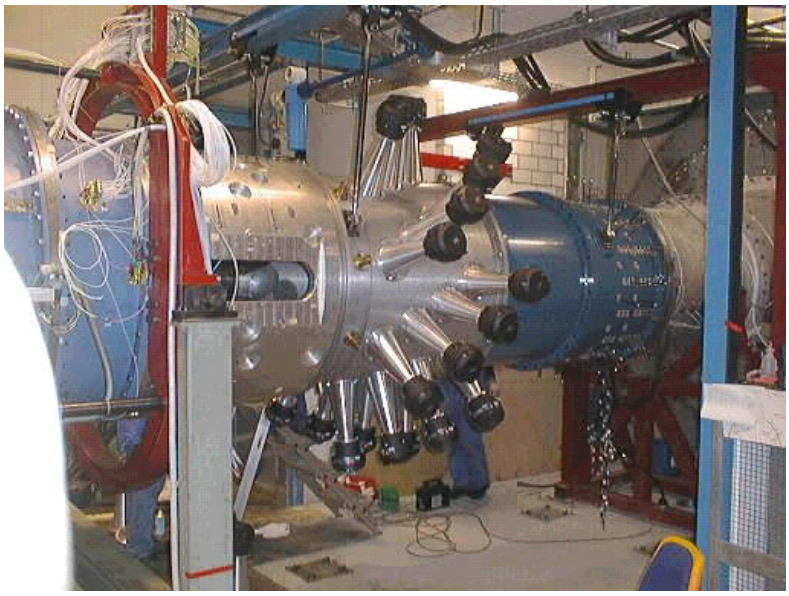


Abbildung 4-12: Foto des Versuchsaufbaus für die aktive Lärmminderung im Einlauf des M2VP Zweiwellenverdichterprüfstand in Köln.

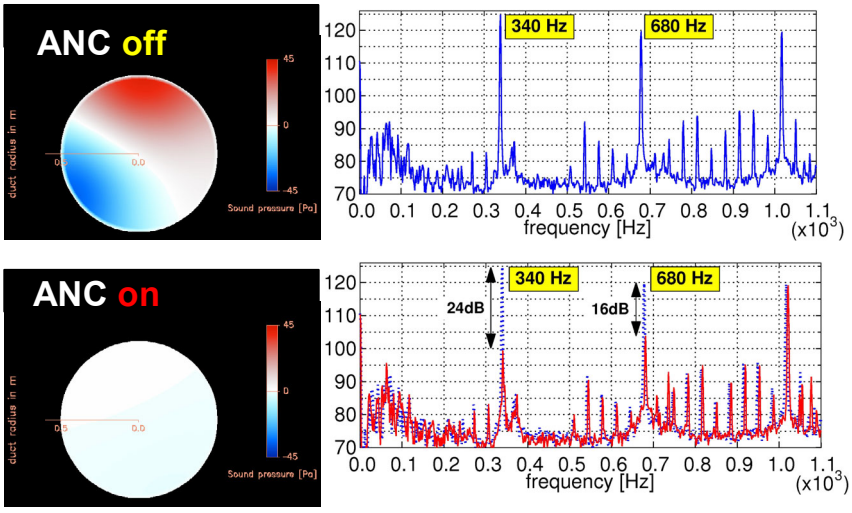


Abbildung 4-13: Messergebnis des Versuchs mit aktiver Lärmminderung durch konventionelle Regelung vor einem gegenläufigen Flugzeugfan. Der Ton bei der Blattfolgefrequenz wurde um 24 dB, bei der zweifachen Blattfolgefrequenz um 16 dB reduziert.

Der Test war ein voller Erfolg. Man erkennt auf der rechten Seite von Abbildung 4-13 im Frequenzspektrum, dass der Tonpegel bei der Blattfolgefrequenz von 340 Hz um 24 dB, bei der ersten Harmonischen von 680 Hz um 18 dB gesenkt werden konnte. Auf der linken Seite ist das momentane Schalldruckfeld in einem Strömungsquerschnitt stromauf des Rotors dargestellt, oben ohne und unten mit aktiver Lärmminderung. Man erkennt, dass die Schalldruckamplituden über dem Querschnitt mit eingeschalteter Regelung sehr stark reduziert sind.

4.3.2. Aktive Lärmminderung durch modale Regelung

Das DLR hat im Rahmen des Projektes ein Regelungsverfahren mit dem Ziel optimiert, den technischen Aufwand für die aktive Lärmminderung erheblich zu reduzieren. Dies wird dadurch erreicht, dass der Gegenschall nur für eine begrenzte Zahl von so genannten akustischen Moden erzeugt wird.

Herkömmliche Regelungsverfahren minimieren global die Summe der Schalldruckquadrate an den Positionen der Fehlermikrofone, wobei bei praxisrelevanten Frequenzen wegen der Komplexität des Schallfeldes viele Ein- und Ausgangssignale (Fehlermikrofone und Lautsprecher) und ein aufwändiger, echtzeitfähiger Regler notwendig sind.

Bei dem modalen Regelungsverfahren kann die Zahl der Reglervariablen reduziert werden, indem nur die dominierenden Schallmoden aktiv unterdrückt werden. Es werden deutlich weniger Sensoren und Lautsprecher benötigt und die erforderliche Regelung kann mit relativ einfacher Regler-Hardware erreicht werden. Dieses sehr robuste Verfahren wurde an einem Axialventilatorprüfstand des DLR realisiert. Der Versuchsstand wird in Abbildung 4-14 vorgestellt. Man erkennt links den Verdichter, rechts davon drei Ringe mit je 8 Lautsprechern. Es folgen 4 Ringe mit je 16 Mikrofonen und eine Modenanalyse-Sektion, mit der der Erfolg der aktiven Lärmminderung überprüft werden kann.

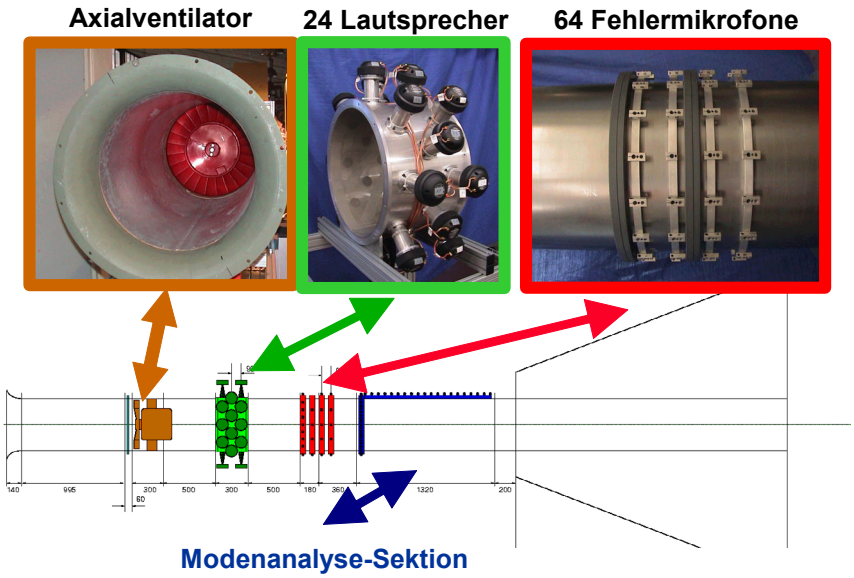


Abbildung 4-14: Versuchsaufbau zur Demonstration des modalen Regelverfahrens zur aktiven Schallminderung.

Der technische Aufwand ist erheblich geringer als bei einer herkömmlichen Regelung. Nicht nur die Zahl der Mikrofone und Lautsprecher ist verringert, sondern auch der Regler, der aus einfacher PC-Hardware besteht und damit eine Größenordnung billiger als ein herkömmlicher Regler ist.

Ein erstes Ergebnis mit modaler Regelung wird in Abbildung 4-15 präsentiert. Das Bild zeigt ein zeitlich und räumlich gemitteltes Autopower-Spektrum ohne (blau) und eines mit (rot) angewandter aktiver Lärmminderung im Vergleich. Die Mittelung der Spektren erfolgte jeweils über 30 Sekunden Messzeit und 16 Mikrofonpositionen, wobei die Mikrofone unabhängig von der Regelung sind. Geregelt wurde der durch die Interaktion des Rotornachlaufs mit den Stator entstehende Ton bei der Blattfolgefrequenz von 960 Hz. Bei dieser Frequenz sind im Strömungskanal mit 0.5 m Durchmesser insgesamt 7 Umfangsmoden mit insgesamt 16 Radialmoden ausbreitungsfähig (d.h. es waren 16 Freiheitsgrade des Schallfelds zu regeln).

Man erkennt eine Minderung des Tonpegels um 12 dB. Die Regelung wurde mit 2 Mikrofonringen mit jeweils 8 Fehlermikrofonen und mit 2 Ringen mit jeweils 8 Lautsprechern durchgeführt.

Geregelt wurde ausschließlich die dominante Umfangsmode m=-1, die sich aus 2 Radialmoden zusammensetzt. Durch die Regelung lediglich zweier Freiheitsgrade von insgesamt 16 war das Regelungssystem extrem robust.

Die aktive Regelung erfolgt im Frequenzbereich und wird nicht in Echtzeit mit einem PC und Low-Cost-Hardware durchgeführt. Die Regelung kann nur die rotor-kohärenten Schallanteile vermindern.

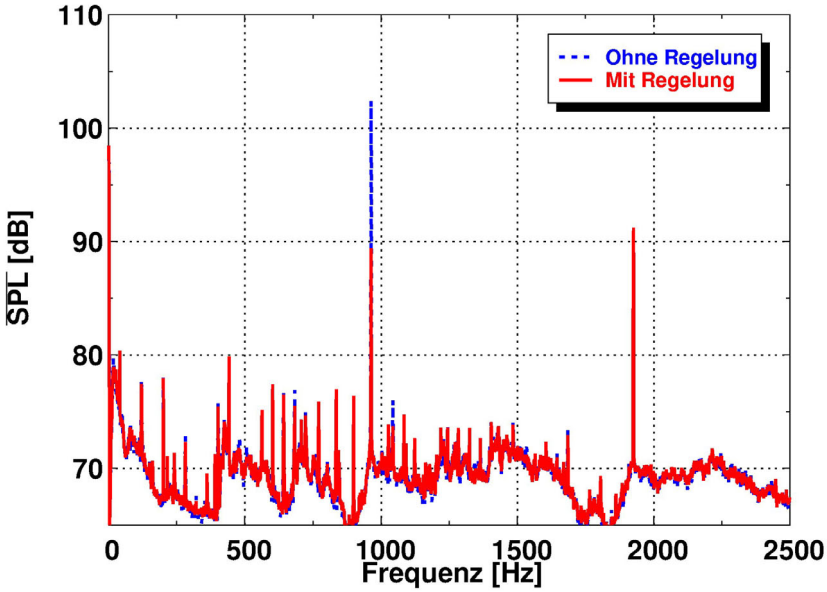


Abbildung 4-15: Versuchsergebnis mit dem modalen Regelverfahren zur aktiven Schallminderung.

Die aktive Lärmminderung mit Gegenschall durch Lautsprecher funktioniert und zwar mit einer aufwändigen konventionellen Methode ebenso wie mit einem neuen, im Rahmen des Projektes entwickelten, einfacheren Verfahren.

4.3.3. Aktive Lärmminderung durch Strömungsbeeinflussung

Im Rahmen des Projektes wurde eine dritte Methode der aktiven Lärmminderung erprobt, die von Mitarbeitern des DLR entwickelt wurde. Es handelt sich um die Erzeugung von Gegenschall an den Rotor- und Stator-Schaufeln durch aktive Beeinflussung der Strömung um die Schaufelspitzen. Wenn dieses Verfahren erfolgreich ist, dann kann man auf den Einbau von Lautsprechern in Flugtriebwerken verzichten und dafür sehr viel robustere und leichtere Bauteile verwenden.

Ziel der Untersuchung war festzustellen, ob es möglich ist, die für aktive Maßnahmen erforderliche Schallleistung der Strömung zu entziehen. Dies wurde am Beispiel des Geräusches eines Axialventilators demonstriert. Die Umströmung der Schaufelspitzen wurde durch Luftstrahlen am Gehäuse gezielt verändert. Der Versuchsventilator ist in Abbildung 4-16 dargestellt.

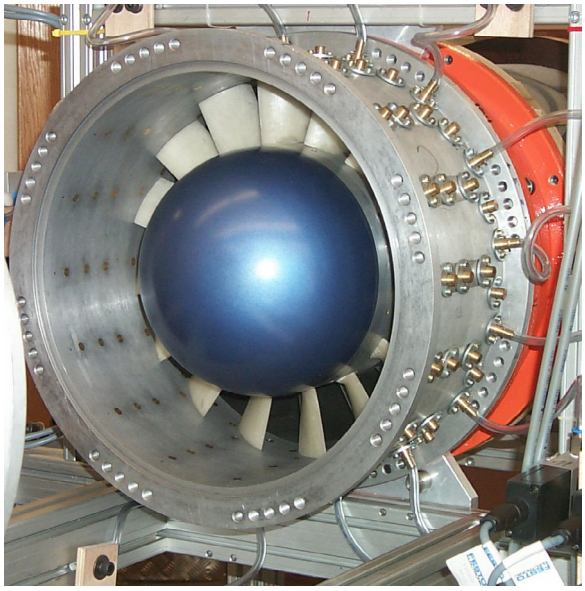


Abbildung 4-16: Versuchsventilator zur Lärmminderung über eine Beeinflussung der Strömung an den Schaufelspitzen.

Ein wichtiger Beitrag zur Finanzierung dieses Vorhabens kam von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 557.

Ein Ergebnis dieser Methode ist in Abbildung 4-17 zu sehen. Man erkennt, dass die Blattfolgefrequenz bei 900 Hz um über 20 dB reduziert werden konnte. Allerdings erhöht sich in diesem Fall der hochfrequente Breitbandpegel deutlich. Die Anzahl von 16 Düsen stimmte mit der Anzahl der Statorschaufeln überein. Der benötigte Luftmassenstrom beträgt nur 0.9% des Hauptmassenstroms. Der Wirkungsgrad des Ventilators unter Berücksichtigung des eingedüsten Luftmassenstroms verbessert sich sogar.

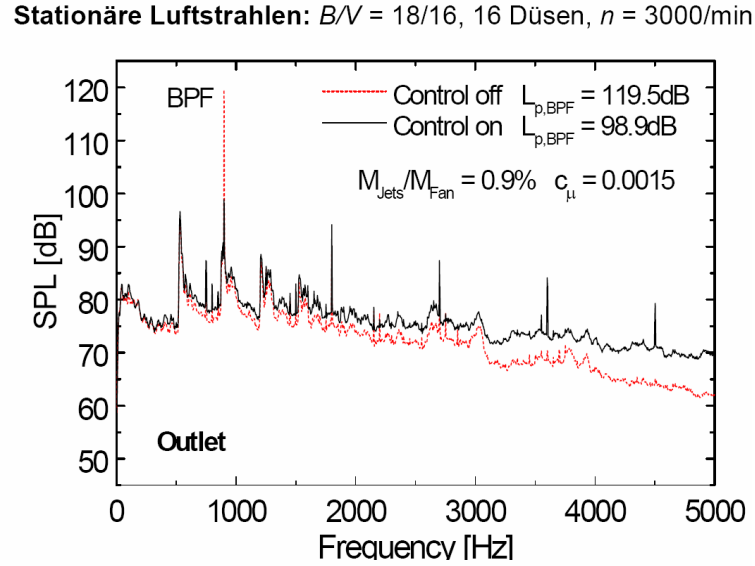


Abbildung 4-17: Ergebnis einer Minderung des Tonpegels bei der Blattfolgefrequenz durch Beeinflussung der Strömung an der Blattspitze.

4.4. Schallfeldanalysen

Von den weiteren Arbeiten im Rahmen des Projektes soll auf besondere Beiträge des DLR hingewiesen werden, mit denen die Entwicklung leiser Triebwerke bei der Industrie unterstützt wird.

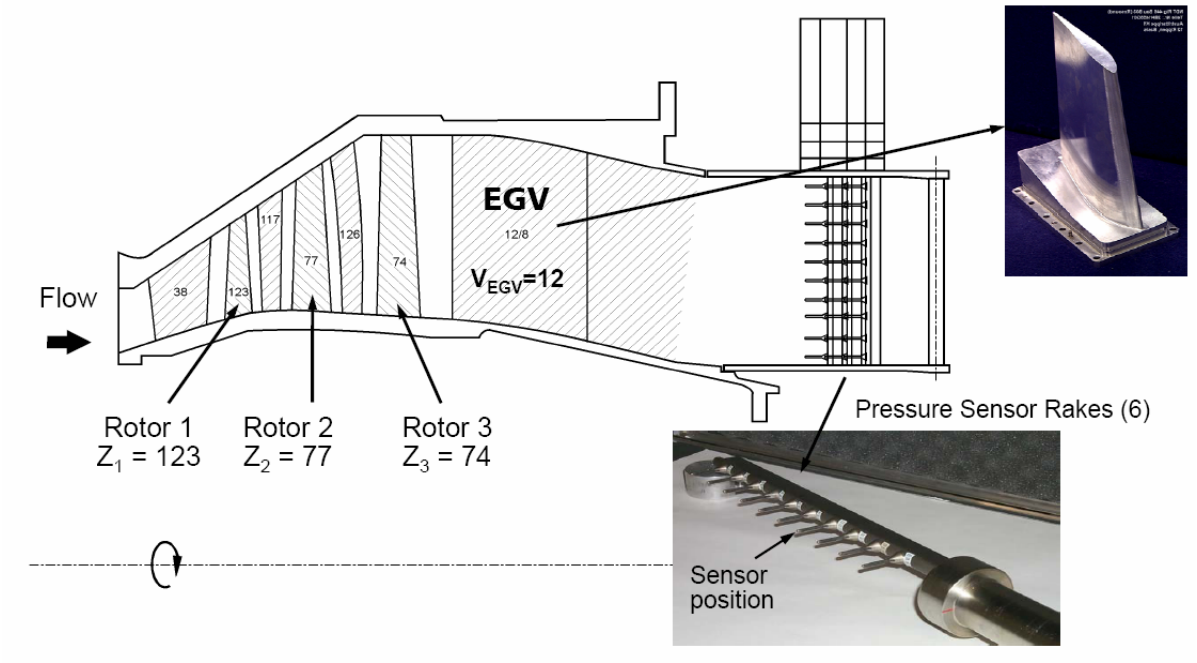


Abbildung 4-18: Skizze des experimentellen Aufbaus der akustischen Turbinenuntersuchungen in Kooperation mit MTU Aero Engines München. Die Fotos zeigen einen von sechs eingesetzten Sensorrechen und eine Schaufel des austauschbaren Austrittsleitgitters.

Neue Triebwerkskomponenten wie Fans, Verdichter, und Turbinen werden stets auf Prüfständen untersucht. Das DLR hat im Rahmen des Projektes Verfahren zur Analyse des Schallfeldes in den Strömungskanälen weiterentwickelt, mit denen die Schallemission der neuen Komponenten bereits auf dem Prüfstand ermittelt werden kann. So konnte in Zusammenarbeit mit der MTU (Abbildung 4-18 zeigt eine Skizze des experimentellen Aufbaus mit Fotos eines Sensorrechens und einer Schaufel des austauschbaren Austrittsleitgitters) die leiseste Turbine einer Reihe von Varianten ermittelt werden. Dazu wurde das Schallfeld hinter der Turbine rechnerunterstützt in bis zu 1500 Radialmoden zerlegt. Dies ermöglichte die Berechnung der von den dominanten Frequenzen in und gegen die Strömungsrichtung abgestrahlten Schallleistung. Der Einfluss verschiedener Austrittleitgitterkonfigurationen (ein Ergebnis der modalen Zerlegung ist in Abbildung 4-20 abgebildet) konnte so qualitativ und quantitativ bewertet werden.

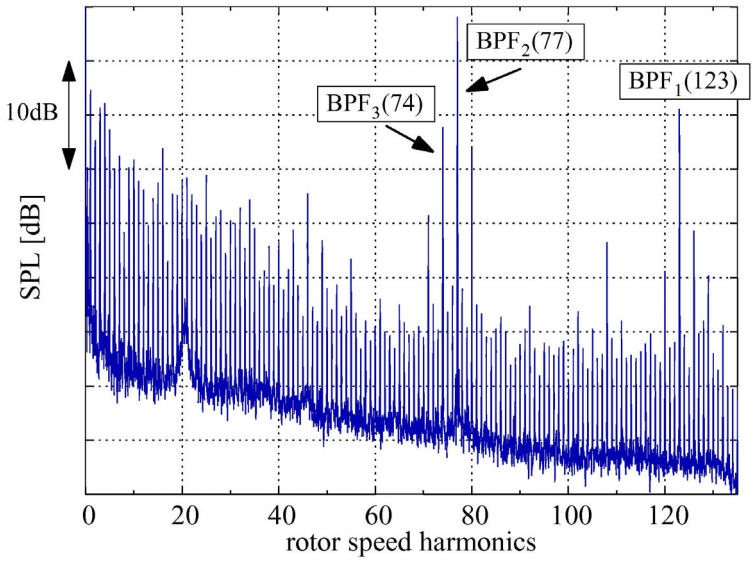


Abbildung 4-19: Spektrum eines Miniaturdrucksensoren im Auslauf der Turbine. Deutlich sichtbar sind die dominanten Blattfolgefrequenzen der drei Rotoren (BPF1-BPF3).

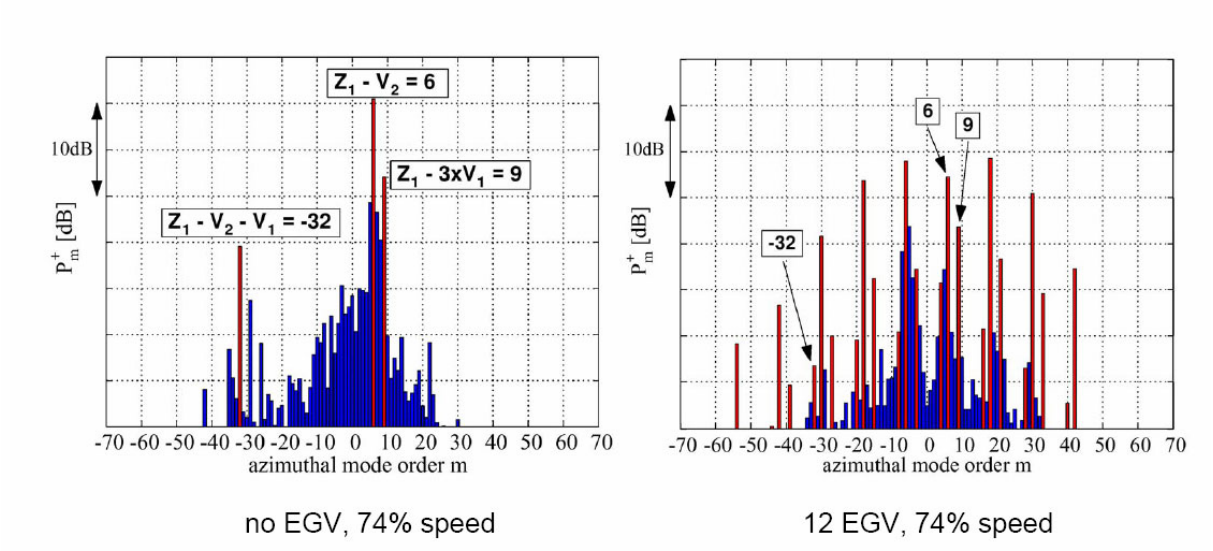


Abbildung 4-20: Modenspektrum der Blattfolgefrequenz von Rotor 1 bei 74% der Auslegungsdrehzahl. Das rechte Bild zeigt die abgestrahlten Moden ohne eingebautes Austrittleitgitter, das linke die Streuung dieser Moden am eingebauten Standardaustrittsleitgitter.

4.5. Zusammenfassung

Die Arbeiten im Projekt beschäftigten sich vor allem mit der Entwicklung technischer Maßnahmen, die zu einer erheblichen Minderung der Triebwerksgeräusche führen werden.

Die numerischen Methoden wurden so weiterentwickelt, dass nicht nur die instationäre Strömung in einem Triebwerksfan, sondern auch dessen tonale Schallemission berechnet werden kann. Die Methode wurde erfolgreich mit Messdaten eines Triebwerksfans vergli-

chen. Auch das experimentell ermittelte Schallminderungspotential eines geneigten Stators von etwa 2 dB konnte numerisch nachgewiesen werden. Das Verfahren wird nun eingesetzt, um das Schallminderungspotential einer neuen Triebwerksgeneration mit Getriebefan nachzuweisen, das in der Größenordnung von 10 dB erwartet wird.

Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit der aktiven Lärmminderung von Tönen. Es wurde gezeigt, dass die aktive Lärmminderung auch bei dem sehr komplizierten Schallfeld eines Flugzeugfans eingesetzt werden kann. Im Rahmen des Projektes wurde ein Regelungsverfahren mit dem Ziel optimiert, den technischen Aufwand für die aktive Lärmminderung erheblich zu reduzieren. Dies wird dadurch erreicht, dass der Gegenschall nur für eine begrenzte Zahl von so genannten akustischen Moden erzeugt wird. Im Rahmen des Projektes wurde auch eine neuartige Methode zur Erzeugung des Gegenschalls an den Rotor- und Stator-Schaufeln durch aktive Beeinflussung der Strömung um die Schaufelspitzen experimentell demonstriert. Wenn dieses Verfahren erfolgreich ist, dann kann man auf den Einbau von Lautsprechern in Flugtriebwerken verzichten und dafür sehr viel robustere und leichtere Bauteile verwenden.

Ein Teil der Arbeiten wurde bereits veröffentlicht, weitere Veröffentlichungen werden folgen. Eine Auswahl von Literaturstellen folgt.

4.6. Schrifttum

[4-1] Neise, W., Enghardt, L.: „Technology approach to aero engine noise reduction.“ Aerospace Science and Technology, Volume 7, Issue 5, (July 2003), 352-363.

[4-2] Neuhaus, L., Schulz, J, Neise, W., Möser, M: „Active control of aerodynamic performance and noise of axial turbomachines.“ Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol 217 Part A: Journal of Engineering for Power (2003), 375-383.

[4-3] Enghardt, L., Tapken, U., Neise, W., Schimming, P., Maier, R., Zillmann, J.: „Active control of fan noise from high-bypass ratio aeroengines: experimental results.“ The Aeronautical Journal of the Aeronautical Society 106 No., 1063 (2002), 501-506.

[4-4] Ashcroft, G., Schulz, J.: „Numerical modelling of wake-jet interaction with application to active noise control in turbomachinery.“ 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 10-12 May 2004, Manchester,UK; Paper No.: AIAA-2004-2853.

[4-5] Schnell, R.: „Investigation of the Tonal Acoustic Field of a Transonic Fanstage by Time-Domain CFD-Calculations with Arbitrary Blade-Counts.“ ASME paper 2004-GT-54216, Wien, Juni 2004.

[4-6] Neise, W.: „Advances in active noise control for aero engines.“ Keynote Address; 9th AIAA/CEAS-Aeroacoustics Conference & Exhibit. Hilton Head, South Carolina, USA, 12-14 May 2003.

[4-7] Neuhaus, L., Neise, W.: „Active flow control to reduce the tip clearance noise and improve the aerodynamic performance of axial turbomachines.“ Fan Noise 2003, Senlis, France, 22.-25. Sept. 2003.

[4-8] Schulz, J., Neise, W., Möser, M: „Active control of the blade passage frequency noise level of an axial fan with aeroacoustic sound sources.“ Acoustique & Technique. Numero 33. ISSN 1263-8072. Paris, 2003. S. 34 – 39.

[4-9] Neise, W.: „Forschung zur Minderung des Triebwerkslärms.“ Proc. 11. Konferenz Verkehrslärm 2002, Dresden, 27. -29.09.2002.

[4-10] Neise, W., Enghardt, L.: „Technology approach to aero engine noise reduction.“ Proc. ODAS 2002 4th ONERA-DLR Aerospace Symposium, Cologne, Germany, 13-14 June 2002, 42-53.

[4-11] Neuhaus, L., Neise, W.: „Active control of the aerodynamic and acoustic performance of axial turbomachines.“ 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 17-19 June 2002, Breckenridge, Colorado. Paper AIAA–2002–2499.

[4-12] Schulz, J., Neise, W., Möser, M.: „Active noise control in axial turbomachines by flow induced secondary sources.“ 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 17-19 June 2002, Breckenridge, Colorado. Paper AIAA-2002-2493.

[4-13] Siller, H.; Michel, U.: „Buzz-Saw noise spectra and directivity from flyover tests.“ 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 17-19 June 2002, Breckenridge, Colorado, Paper AIAA-2002-2562.

[4-14] Enghardt, L., Tapken, U., Neise, W., Schimming, P., Maier, R., Zillmann, J.: „Active control of fan noise from high-bypass ratio aeroengines: Experimental results.“ 8th CEAS European Propulsion Forum, 26-29 March 2001, Nottingham, UK, Paper No.: 16.1-16.7.

[4-15] Enghardt, L., Tapken, U., Neise, W., Kennepohl, F., Heinig. K.: „Turbine blade/vane interaction noise: acoustic mode analysis using in-duct sensor rakes.“ 7th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, 28-30 May 2001, Maastricht, Netherlands. Paper No.: AIAA-2001-2153.

[4-16] Tapken, U., Enghardt, L., Neise, W., Schimming, P.: „Active Control of Noise from Turbomachines – Results of Radial Mode Analysis.“ Internoise 2001, 30th International Congress on Noise Control Engineering, 27-30th August 2001, The Hague, Netherlands.

[4-17] Siller, H., Arnold, F., Michel, U.: „Investigation of aero-engine core-noise using a phased microphone array.“ 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 28-30 May 2001, Maastricht.

5. Minderung des Umströmungslärms

Arbeitspaket 2B: ***Dr. Werner Dobrzynski, E-Mail:*** werner.dobrzynski@dlr.de
DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,
Abteilung Technische Akustik, Braunschweig

5.1. Forschungsziel

Im Einzelnen sollen die folgenden Ziele erreicht werden:

- Erarbeitung von Konstruktionsvorschlägen zur Minderung des Fahrwerkslärms um 3 dB
- Aufklärung der Entstehungsmechanismen von tonalem und breitbandigem Lärm am Vorflügel und an der Landeklappenseitenkante
- Entwicklung von Technologien zur Lärmminderung an Hochauftriebssystemen um 3 dB und Klärung der Wirkungsmechanismen
- Aufklärung der Einflüsse der Klappenstellungsparameter auf den Lärm von Hochauftriebssystemen
- Quantifizierung des Wechselwirkungslärms Fahrwerk/Klappe und Entwicklung von Lärmminderungstechnologien
- Validierung der Windkanalmessergebnisse durch Überfluglärmmessungen unter kontrollierten Bedingungen für Prognosezwecke

Im Ergebnis soll bei dominierendem Umströmungsgeräusch im Landeanflug eine Halbierung der am Boden auftreffenden Schallenergie erreicht werden.

5.2. Methodik

Numerische Verfahren der CAA (Computational AeroAcoustics) zur Beschreibung der wesentlichen Umströmungslärmquellen an Verkehrsflugzeugen hatten in den vergangenen Jahren noch nicht den Stand erreicht, dass ihre Anwendung bei technisch relevanten Konfigurationen das Erreichen der Projektziele ermöglicht hätte. Daher basieren die Arbeiten zur Klärung von Schallquellmechanismen und zur Entwicklung von Lärmminderungsmaßnahmen auf experimentellen Untersuchungen in aeroakustischen Windkanälen.

Diese sind der Deutsch-Niederländische Windkanal (DNW-LLF) und der Aeroakustische Windkanal Braunschweig (AWB). Der letztere ist auf Grund seiner Größe (Düsenquerschnitt 1,2 m x 0.8 m) ein preisgünstiger Forschungskanal und damit für die Durchführung von Grundlagenarbeiten geeignet. Dagegen sind im DNW-LLF (Düsenquerschnitt 8 m x 6 m) Lärmmessungen an realen Bauteilen möglich, aus Kostengründen aber immer nur im Zusammenhang mit EU-Projekten. Tatsächlich bestand daher bei einigen Teilaufgaben eine Verzahnung mit Arbeitsinhalten aus den EU-Projekten RAIN und SILENCER.

Die Ergebnisse der Windkanalstudien dienten nicht zuletzt auch der Entwicklung von halbempirischen Schallquellmodellen für die Anwendung in Lärmprognoseverfahren. Zur Validierung der erarbeiteten Schallquellmodelle wurden Überfluglärmmessungen an einem Airbus A319 der Deutschen Lufthansa durchgeführt. Ergänzend zu den ursprünglich im Projektplan verabredeten Referenzmessungen zur Erstellung einer Lärmdatenbasis für Prognosezwecke, wurden im Zuge dieser Messkampagne auch ausgewählte Lärmminderungsmaßnahmen untersucht.

5.3. Ergebnisse

Zu Gunsten einer geschlossenen Darstellung der im Arbeitspaket 2B erzielten Ergebnisse wird im Folgenden nicht auf die oben genannten Einzelzielsetzungen Bezug genommen, sondern einer Gliederung in Anlehnung an die technischen Anwendungsgebiete der Vorzug gegeben:

- Fahrwerkslärm
- Hochauftriebslärm
- Interaktionslärm
- Validierungsmessungen.

In der abschließenden Zusammenfassung wird die Zielerreichung dann im Einzelnen dargestellt.

5.3.1. Fahrwerkslärm

Basierend auf den Erkenntnissen zur Schallabstrahlung von A320 Flugzeugfahrwerken aus einer früheren Auftragsarbeit, konnten im Rahmen der Mitarbeit im EU-Projekt RAIN an A340 Fahrwerken Maßnahmen zur Lärmminderung entwickelt und deren Wirksamkeit durch Lärmmessungen im Windkanal (DNW-LLF) nachgewiesen werden.

Da ein Flugzeugfahrwerk infolge der Umströmung seiner komplexen Mechanik ein Cluster von Strömungsschallquellen darstellt, kann eine Lärmminderung nur durch strömungsgünstige Verkleidungen der bezüglich Lärmabstrahlung wesentlichsten Baugruppen erfolgen, wenn nicht eine lärmarme Gestaltung schon im Entwurfsstadium bei Neuentwicklungen realisiert werden kann. Nachrüstbare Lärmminderungsmaßnahmen für heutige Fahrwerkskonfigurationen müssen allerdings vielen Randbedingungen Rechnung tragen, die neben der Funktionalität im Zusammenhang stehen mit Sicherheitsaspekten, Standzeit am Boden und Kosten durch Zusatzgewicht oder erhöhten Wartungsaufwand.

Als Ergebnis umfangreicher Windkanalmessungen wurde für eine erfolgreiche Lärmminderung die Verkleidung folgender Fahrwerkskomponenten ermittelt (angegeben in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit):

- Drehgestell
- Bremsen
- Felgenhohlräume
- Gelenkverbindungen
- Schachttür-Bein Kombination.

Während bei einer (bewusst) unrealistischen Vollverkleidung eines A320 Fahrwerks ein Lärmminderungspotenzial von mehr als 10 dB ermittelt wurde, konnten durch die an A340 Fahrwerken realisierten Teilverkleidungen (Abb. 5-1) immerhin noch Lärmminderungen von bis zu 5 dB erreicht werden. Im Zuge dieser Messungen wurde auch die Richtwirkung der Schallabstrahlung bestimmt. Diese erweist sich als wenig ausgeprägt, was wegen des Zusammenwirkens sehr vieler verschiedener und unterschiedlich ausgerichteter Schallquellen in der Fahrwerksstruktur nicht verwundert. Weiterhin zeigte sich, dass die Schallintensität mit der 6. Potenz der Anströmgeschwindigkeit ansteigt. Unter Einbeziehung der ersten Messergebnisse von A320 Fahrwerken konnte aus dem verfügbaren Datensatz auch eine empirische Korrelation zwischen Lärmpegel und Fahrwerksgröße (bei ähnlicher Konfiguration) abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse wurden zur Formulierung eines ersten einfachen Quellmodells für den Fahrwerkslärm herangezogen [5-2,-14,-16,-18].

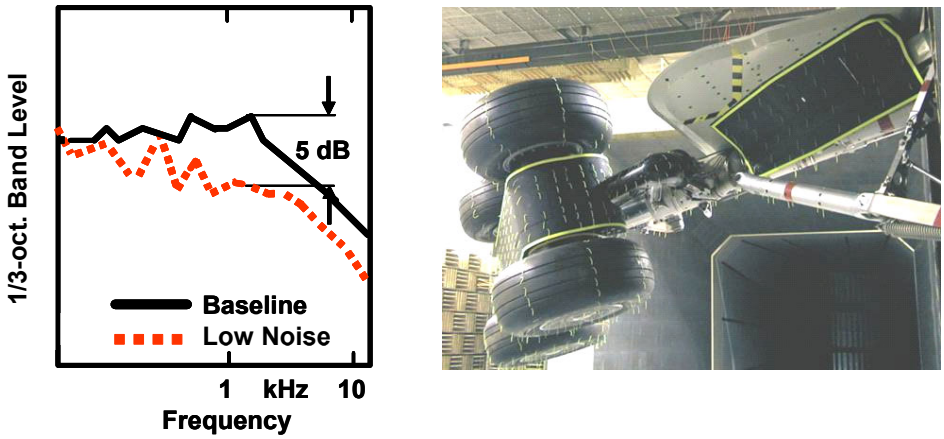


Abbildung 5-1: Lärmminderungspotenzial für das A340 Hauptfahrwerk mit Teilverkleidungen nach Lärmmessungen im DNW-LLF

5.3.2. Hochauftriebslärm

Analysen zur Bewertung des Lärms von Hochauftriebssystemen konnten sich auf einen umfangreichen Datensatz aus verschiedenen Lärmmessungen im DNW-LLF stützen, die zum Teil im Rahmen der EU-Projekte RAIN und SILENCER durchgeführt worden waren. Dies waren Messungen am 1:7,5 Modell des A320, am 1:10,6 Modell des A340 und am A320 Originalflügel, jeweils in Landekonfiguration. Die hierbei und durch ergänzende Quellstudien im AWB am generischen 2D-Hochauftriebsmodell gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt. Dabei wird zunächst die Rangfolge verschiedener Quellen diskutiert und sodann werden für die Wichtigste ein vereinfachtes semiempirisches Quellmodell angegeben und Maßnahmen zur Lärmminderung aufgezeigt.

5.3.2.1. Bewertung von Schallquellen

Im Vergleich der Ergebnisse aus Lärmmessungen am A320 Ganzmodell und am Originalflügel im DNW-LLF zeigte sich zunächst, dass lärmrelevante Einzelheiten in der Originalkonfiguration an Modellen typischerweise nicht reproduziert werden. Dies sind vor allem verschiedene Hohlräume in überströmten Oberflächen und Klappenkanten sowie in die Strömung ragende Konstruktionselemente wie z.B. Klappenhalter (Abb. 5-2). Für den A320 kann erwartet werden, dass allein nach Beseitigung „konstruktionsbedingter“ Zusatzschallquellen wie

- Flügelausschnitte für Vorflügelhalter,
- Hohlräume in der Klappenseitenkante,
- Löcher in der Flügeloberfläche und
- Vorflügelhalter und Klappenhaltermechanik,

der Umströmungslärm des Hochauftriebsflügels um ca. 2 dB gemindert werden kann. Damit wird deutlich, dass Modellmessergebnisse nicht unmittelbar auf die Großausführung übertragen werden können.

Die weitere Auswertung der an den verschiedenen Modellen gewonnenen Messergebnisse zeigte den Vorflügel als wesentliche Quelle tieffrequenten Lärms und die Klappenseitenkante als hochfrequente Lärmquelle. Dabei erweist sich die Klappenseitenkante zwar als die (pro Flächeneinheit) intensivere aber dafür weniger ausgedehnte Quelle, so dass in der Folge der Vorflügellärm für den Gesamtlärm bestimmend ist [5-1,-5,-6,-7,-8,-9,-12,-13].

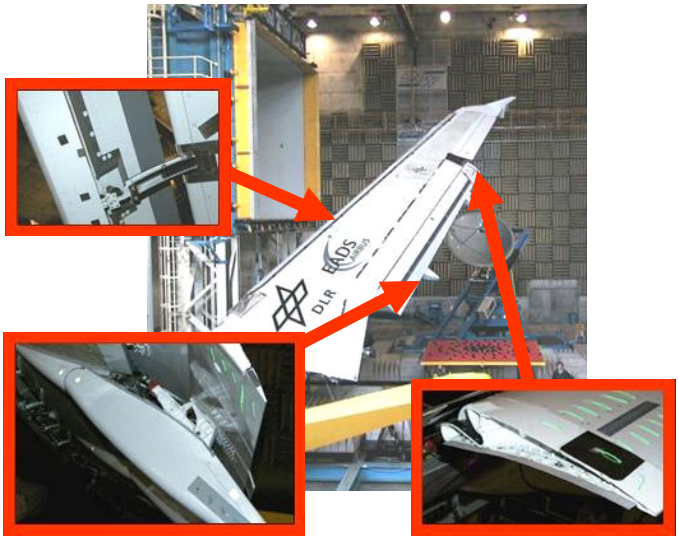


Abbildung 5-2: A320 Flügel im DNW-LLF zur Messung von Strömungsgeräuschanteilen durch Vorflügelhalter mit Durchbrüchen im Hauptflügel, Klappenhalter und Hohlräume in der Klappenseitenkante

5.3.2.2. Quellmodel für Vorflügellärm

Detaillierte Quellstudien wurden insbesondere am Vorflügel durchgeführt, da er als die wesentlichste Lärmquelle am Hochauftriebssystem erkannt wurde. Es konnte gezeigt werden, dass die Richtcharakteristik des Vorflügellärms ein Maximum entgegen der Flugrichtung aufweist. Aus dem Vergleich der Messergebnisse am Modell und am Originalflügel des A320 ergab sich, dass der Frequenzmaßstab des Vorflügellärms zur geometrischen Größe des Vorflügels umgekehrt proportional ist, aber mit der Anströmgeschwindigkeit proportional wächst. Weiterhin zeigte sich, dass die Schallintensität mit der 4,5ten Potenz der Anströmgeschwindigkeit und proportional zur geometrischen Größe des Vorflügels ansteigt. Als charakteristische Größe wird hierbei die Vorflügelsehne gewählt. Einen Vergleich der dementsprechend normierten Messergebnisse vom A320 Modell und dem Originalflügel zeigt Abb. 5-3.

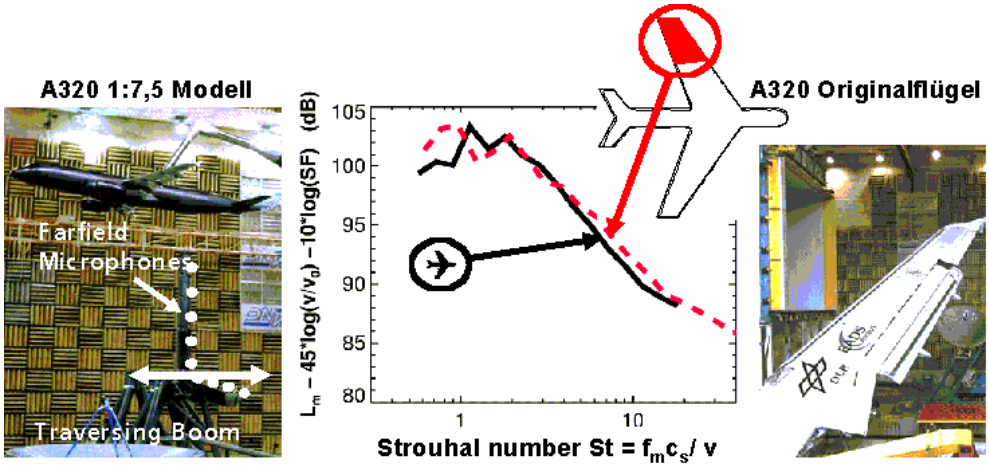


Abbildung 5-3: Vergleich der Spektren des Vorflügelgeräusches aus Messungen am 1:7,5 Modell des A320 und dem Originalflügel zur Ermittlung von Skalierungsgesetzen (Referenzgeschwindigkeit v_0 = 100 m/s)

Angesichts des erheblichen Größenunterschiedes der betrachteten Vorflügelkonfigurationen (Skalierungsfaktor SF = 7,5) ist die sich ergebende Übereinstimmung der über der Strouhal-Zahl aufgetragenen, normierten Geräuschspektren ausgezeichnet.

Eine detaillierte Untersuchung der stationären und instationären Strömungseigenschaften im Vorflügelbereich wurde am generischen 2D-Hochauftriebsmodell im AWB durchgeführt. Ziel dieser Studien war die Korrelation von Lärmmessdaten mit lokalen Strömungsgrößen im Hinblick auf die Entwicklung eines semiempirischen Schallquellmodells. Diese Arbeiten konzentrierten sich insbesondere auf den Bereich der konkaven Vorflügelrückseite mit dem bei Landekonfiguration (Anstellwinkel etwa 5°) hier eingelagerten Rückseitenwirbel. Neben Turbulenzmessungen in dieser Wirbelströmung bis zur oberen Abströmkante des Vorflügels wurden begleitend auch CFD-Rechnungen (2D-RANS) zur Beschreibung der Vorflügelumströmung durchgeführt.

Die Analyse der Mess- und Rechenergebnisse unterstützt die Hypothese, dass der Vorflügellärm im Wesentlichen durch die turbulente Überströmung der (oberen) Vorflügelhinterkante bestimmt wird. Demnach kann das Vorflügelgeräusch als „klassischer“ Hinterkantenschall aufgefasst werden, dessen Intensität außer von der Abströmungsgeschwindigkeit aber entscheidend auch vom Turbulenzgrad der abfließenden Spaltströmung abhängt. Im Einzelnen zeigte sich, dass mit abnehmendem Anstellwinkel der Rückseitenwirbel und damit die Turbulenz in der Spaltströmung anwachsen, was phänomenologisch den im Modellversuch registrierten leichten Anstieg des Vorflügellärms mit sinkendem Anstellwinkel erklären könnte. Demgemäß wäre die geometrische Größe des Rückseitenwirbels zur Bildung einer die Schallquelle beschreibenden Strouhal-Zahl geeigneter als die geometrische Größe des Vorflügels. Ein Nachweis zur Richtigkeit dieser Aussage kann auf experimentellem Wege heute jedoch nicht geführt werden, da alle untersuchten Vorflügel ähnliche Geometrien aufweisen und in Lärmuntersuchungen bisher nur kleine Anstellwinkelbereiche vermessen wurden.

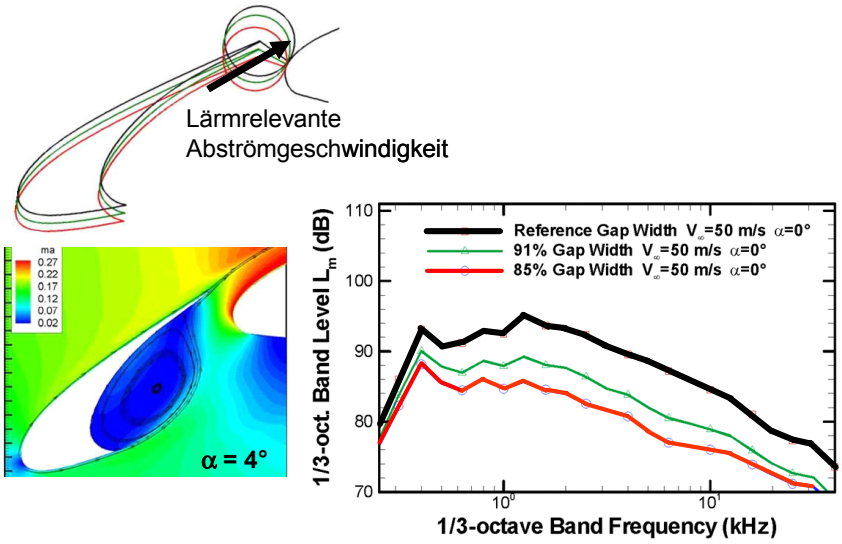


Abbildung 5-4: Lärmminderungspotenzial von 10 dB durch Verringerung der Spaltbreite mit bis zu 4 % Verlust an Maximalauftrieb

Die Korrelation lokaler Strömungsfeldgrößen (aus CFD-Rechnungen) mit gemessenen Schalldruckspektren zeigt, dass die rückseitige Abströmgeschwindigkeit an der oberen Hinterkante des Vorflügels die Schallabstrahlung am deutlichsten beeinflusst. So konnte durch eine systematische Verringerung der Vorflügelspaltbreite (bis auf 85% des Ausgangszustands) eine beträchtliche Lärmminderung erreicht werden, die zum großen Teil durch die mit der Spaltverengung verbundene Absenkung der Abströmgeschwindigkeit an der Vorflügelhinterkante verursacht wird (Abb. 5-4). Die gleichzeitig für eine Verengung der Spaltweite berechnete Absenkung des Maximalauftriebsbeiwertes blieb dabei unter 4 %. Diese Parame-

terstudie zeigt die Notwendigkeit, die Optimierung von Vorflügeleinstellungen künftig in Abstimmung zwischen aerodynamischem und akustischem Verhalten vorzunehmen.

Vorflügellärm weist maximale Pegel bei einer mit der Vorflügelsehne und der Anströmgeschwindigkeit gebildeten Strouhal-Zahl von St = 2 auf (siehe Abb. 5-3). Bei Lärmmessungen am generischen 2D-Modell treten gerade in dem hier zugehörigen Frequenzbereich starke Tonphänomene auf, die durch Transitionsstreifen an der unteren Vorflügelabströmkante beseitigt oder stark gemindert werden können. Ähnliche Tonphänomene wurden auch schon bei 3D-Hochauftriebskonfigurationen beobachtet, allerdings in deutlich abgeschwächter Form. Der Mechanismus der Tonentstehung konnte trotz detaillierter Untersuchung dieses Problems bis heute noch nicht genau geklärt werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass hier ein Rückkoppelungsmechanismus vorliegt, der seine Anregung aus (spannweitig) kohärenten Fluktuationen des Rückseitenwirbels infolge laminarer Ablösung an der unteren Vorflügelkante bezieht.

Die umfassende Bewertung der aus den experimentellen Untersuchungen ermittelten Eigenschaften des Vorflügellärms führte für die Quellmodellierung zum Ansatz einer spannweitigen Verteilung von kompakten Dipolquellen an der Hinterkante des Vorflügels (Abb. 5-5). Dabei wird berücksichtigt, dass im wesentlichen Frequenzbereich (Strouhal-Zahlen um 2) die Schallwellenlänge deutlich größer ist als die Vorflügelsehne.

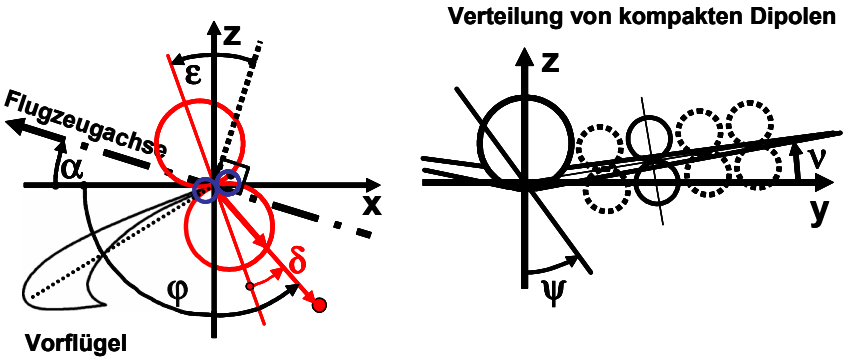


Abbildung 5-5: Dipol-Quellmodell zur Simulation des Umströmungsgeräusches vom Vorflügel

Demgegenüber berücksichtigt dieses Quellmodell weder die Einflüsse des benachbarten (ausgedehnten) Hauptflügels noch die der Schallausbreitung durch die Geschwindigkeitsgradienten im Vorflügelspalt auf die Abstrahlcharakteristik. Das auf der Basis dieses einfachen Quellmodells entwickelte semiempirische Lärmprognoseverfahren muss daher mit jeweils neu verfügbaren Daten immer wieder systematisch überprüft und neue Erkenntnisse zur Verbreiterung der physikalischen Basis herangezogen werden.

Als Eingangsdaten werden neben Fluggeschwindigkeit und Anstellwinkel lediglich globale Geometriegrößen des Vorflügels und der Tragflächen benötigt. Unter der Voraussetzung, dass bei heutigen Verkehrsflugzeugen der Vorflügel die dominierende Lärmquelle darstellt, kann das Modell daher in idealer Weise für Lärmprognoserechnungen verwendet werden. [5-10,-15,-19, -21].

5.3.2.3. Lärmminderungsmaßnahmen am Vorflügel und an der Klappenseitenkante

Entsprechend der Erkenntnis, dass Vorflügellärm im Wesentlichen auf Hinterkantenschall basiert, sind zwei sich ergänzende Konzepte zur Lärmminderung denkbar:

- Reduktion der über die Hinterkante abströmenden Turbulenz aus dem Rückseitenwirbel (Minderung der Quellgrößen) und in Ergänzung
- Verminderung des Abstrahlwirkungsgrades an der Hinterkante durch geeignete Kantenmodifikation.

Die größtmögliche Verminderung der Turbulenz der Abströmung über die obere Vorflügelhinterkante könnte durch vollständige Profilierung der Vorflügelrückseite erreicht werden, so dass kein Rückseitenwirbel mehr auftritt. Diese Lösung ist allerdings nicht praktikabel, da die Nase des Hauptflügels bei eingezogenem Vorflügel im Reiseflug in die konkave Vorflügelrückseite passen muss. Daher wurden technische Kompromisslösungen gesucht. Eine Möglichkeit besteht darin, eine starre – aber einziehbare – Teilabdeckung der konkaven Vorflügelrückseite mit einer der Wirbeltrennstromlinie entsprechenden Kontur vorzusehen (ausgelegt für typische Anstellwinkel im Landeanflug). Eine solche Lösung wurde im Windkanalversuch sowohl am A320 Modell wie auch am Originalflügel erfolgreich erprobt. Es konnte ein Lärmminderungspotenzial von 2 bis 3 dB nachgewiesen werden, jedoch wird durch diese Maßnahme auch der Maximalauftrieb vermindert. Abhilfe kann hier durch eine flexible Abtrennung des Rückseitenwirbels von der Spaltströmung geschaffen werden, z.B. durch einen Bürstenansatz an der unteren Vorflügelabströmkante. Eine solche Konfiguration wurde auch im Windkanalversuch getestet, zeigte jedoch nicht immer die gewünschte lärmmindernde Wirkung.

Weitere Untersuchungen zielten ab auf die Verminderung des Abstrahlwirkungsgrades von der überströmten oberen Vorflügelhinterkante. Schall entsteht an überströmten Kanten durch Umwandlung eines Teils der turbulenten Wanddruckschwankungen in ausbreitungsfähige Druckwellen. Da dieser Prozess ursächlich mit der unstetigen Änderung der Randbedingungen an der Kante zusammenhängt, wurde eine Änderung der Kanteneigenschaften im Sinne eines mehr stetigen Überganges von der harten Wand in die freie Strömung als potenzielle Lösung zur Lärmminderung angesehen. Die praktische Umsetzung erfolgte in Form eines in Hauptströmungsrichtung ausgerichteten Bürstenansatzes an der oberen Vorflügelhinterkante. Im Windkanalversuch konnte sowohl im Modellmaßstab als auch am A320 Originalflügel (Abb. 5-6) eine Minderung des Vorflügellärms um 3 dB erreicht werden.

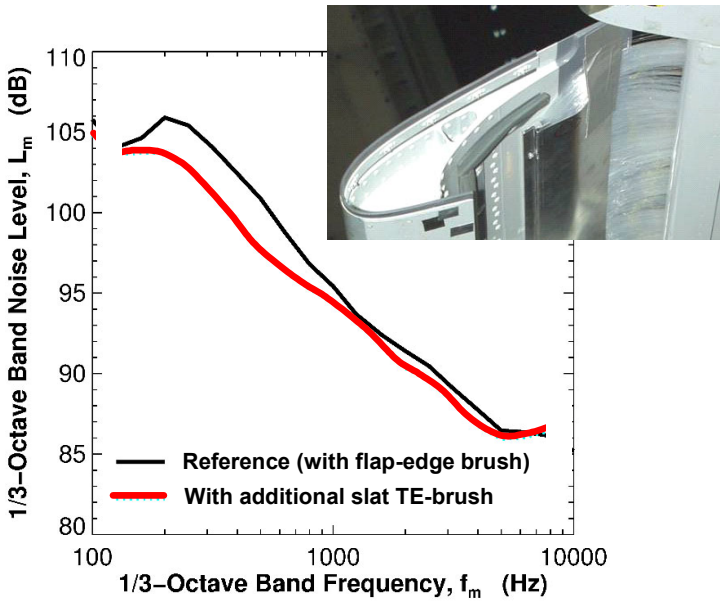


Abbildung 5-6: Lärmminderung am Vorflügel durch Bürstenansatz an der oberen Abströmkante

In ähnlicher Weise konnte auch das Strömungsgeräusch von den Seitenkanten der Landeklappen gemindert werden. Hier führte die Installation von Bürstenendkanten (Abb. 5-7) oder auch von porösen Endkanten zu einer drastischen Absenkung des Seitenkantenlärms, der im Gegensatz zum Vorflügellärm bei hohen Frequenzen seinen Beitrag zum Gesamtgeräuschspektrum leistet. Der Vergleich der in Abb. 5-7 dargestellten Quellverteilungen zeigt, dass durch die Bürstenendkante die Klappenseitenkante als Lärmquelle praktisch verschwunden ist. Da das Fernfeldgeräusch aber durch die Beiträge vieler verschiedener

Schallquellen bestimmt wird, zeigt das zugehörige Fernfeldgeräuschspektrum „nur“ eine breitbandige Lärmminderung von 2 dB.

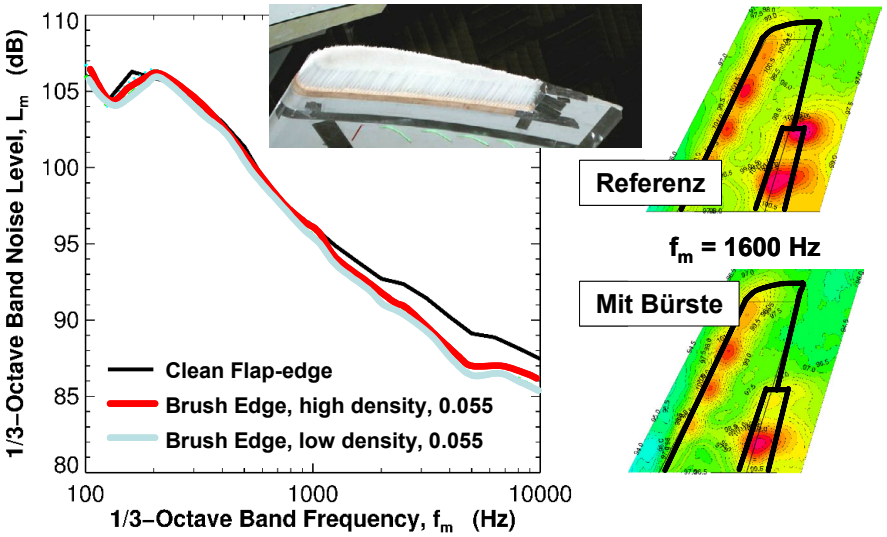


Abbildung 5-7: Minderung des Klappenseitenkantenlärms durch Bürstenansatz an der Seitenkante

Zur Zeit sind die Mechanismen der Lärmminderung durch Bürstenkanten allerdings noch nicht vollständig erfasst, so dass weder Skalierungsgesetze noch das Optimierungspotenzial bekannt sind. Daher wurden weitergehende aeroakustische Untersuchungen zu den relevanten Quellmechanismen an einem generischen Hinterkantenmodell im AWB eingeleitet. Dieses Modell besteht aus einer beidseitig umströmten ebenen Platte variabler Sehnenlänge. Zur Untersuchung verschiedener Kantenkonfigurationen ist die Abströmkante auswechselbar. Erste Ergebnisse bestätigen die lärmmindernde Wirkung von Bürstenkanten (Abb. 5-8).

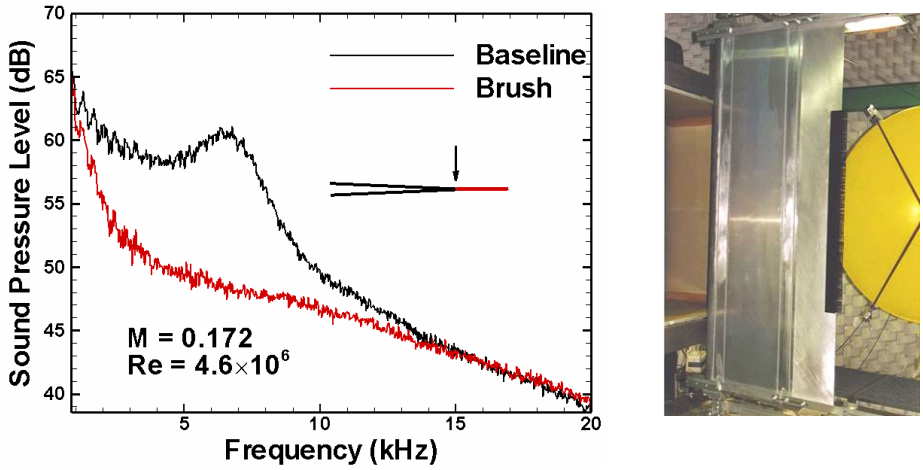


Abbildung 5-8: Aeroakustische Untersuchungen im AWB zur Minderung des Hinterkantenlärms durch Bürstenkanten

In diesem Grundlagenexperiment werden insbesondere die Einflüsse der wesentlichen Auslegungsparameter von Bürstenkanten, wie z. B. Dicke, Dichte, Länge und Flexibilität, im Hinblick auf das erreichbare Lärmminderungspotenzial ermittelt. Für die Beschreibung der Quellmechanismen sollen darüber hinaus die Zusammenhänge zwischen den akustischen Messgrößen und den stationären und instationären Strömungsgrößen im Kantenbereich bestimmt werden [5-4, -11,-17].

5.3.3. Interaktionslärm

Zusätzlicher Strömungslärm kann entstehen, wenn der turbulente Strömungsnachlauf von Fahrwerken auf stromab ausgefahrene Landeklappen auftrifft. Die Identifizierung und Quantifizierung dieser Interaktionslärmquellen ist infolge ihrer räumlichen Nähe zum Fahrwerk aus den Ergebnissen von Überflugmessungen aber praktisch nicht möglich. Daher wurden Modelluntersuchungen (Maßstab 1:13 bezüglich dem A340) zur Bestimmung der Interaktionslärmcharakteristika am generischen 2D-Hochauftriebsmodell im AWB in Kooperation mit dem NLR durchgeführt. Diese Arbeiten waren auch Bestandteil des EU-Projekts SILENCER.

Das entsprechende Arbeitspaket in SILENCER umfasste auch systematische Untersuchungen der Nachlaufströmungen der Gesamtanordnung Hauptfahrwerk/Fahrwerksschacht im AWB. Hierbei zeigte sich, dass für praktisch relevante Abstände stromab des Fahrwerksbeins sowohl die Strömungsprofile als auch die Turbulenzcharakteristika des Nachlaufs nahezu unbeeinflusst sind von der geometrischen Modelldetaillierung. In einem anderen Arbeitspaket in SILENCER wurden auch die Nachlaufströmungen von Zentralfahrwerken für verschiedene Modellmaßstäbe untersucht. Die Ergebnisse aus dieser Studie konnten dahingehend genutzt werden, als hier gezeigt wurde, dass keine wesentlichen Einflüsse der Reynoldszahl auf die Nachlaufcharakteristika bestehen.

Daher konnte zur Modellierung des Fahrwerksnachlaufs für die Modellversuche ein vereinfachter „Fahrwerkssimulator“ eingesetzt werden, im Wesentlichen nur bestehend aus dem Fahrwerksbein, der Seitenkraftstütze und der Schachttür. Abb. 5-9 zeigt den Versuchsaufbau im AWB mit generischem Hochauftriebsmodell und Fahrwerkssimulator und dem Mikrofonarray des NLR zur Schallquelllokalisierung. Die Landeklappe des Hochauftriebsmodells war mit Drucksensoren zur Vermessung der instationären Druckverteilung ausgestattet.

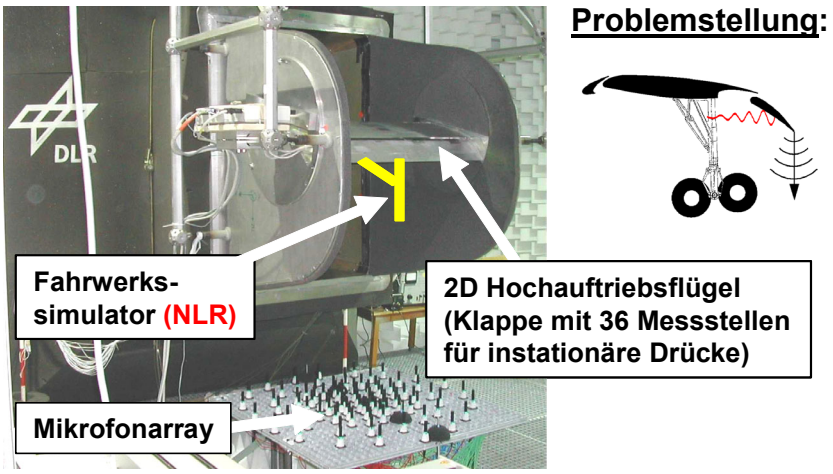


Abbildung 5-9: Versuchsaufbau im AWB zur Untersuchung des Zusatzlärms durch Wechselwirkung des Fahrwerksnachlaufs mit der Landeklappe

Diese Studie erbrachte die folgenden Erkenntnisse:

- Gegenüber anderen Lärmquellen am Hochauftriebsflügel liefert der Interaktionslärm durch turbulente Anströmung der Landeklappe einen bedeutenden Beitrag zum Gesamtlärm für Frequenzen bis ca. 5 kHz im Modellmaßstab (entspricht etwa 0,4 kHz beim Original). Abb. 5-10 zeigt als Ergebnis einer Array-Messung (Beitrag des NLR) beispielhaft die Schallquellverteilung für zwei verschiedene Frequenzen.
- Turbulenz infolge des Überströmens des offenen Fahrwerksschachtes wird im Spalt zur Landeklappe auf die Saugseite der Klappe transportiert, während Turbulenz im

Strömungsnachlauf des Fahrwerksbeins über die Druckseite des Klappenprofils abströmt.

- Der turbulente Nachlauf des Fahrwerksbeins ist für die Erzeugung von zusätzlichen Strömungsgeräuschen bedeutender als Strömungsturbulenzen im Gefolge der Scherschicht über dem offenen Fahrwerksschacht.
- Interaktionslärm wird vornehmlich gegen die Anströmrichtung abgestrahlt und steigt entsprechend der 6. Potenz der Anströmgeschwindigkeit.
- Interaktionslärm wird im Wesentlichen vom Nasenbereich der Landeklappe erzeugt (siehe Abb. 5-10) und kann durch poröse Oberflächen (Metallschaumeinsatz) deutlich gemindert werden.

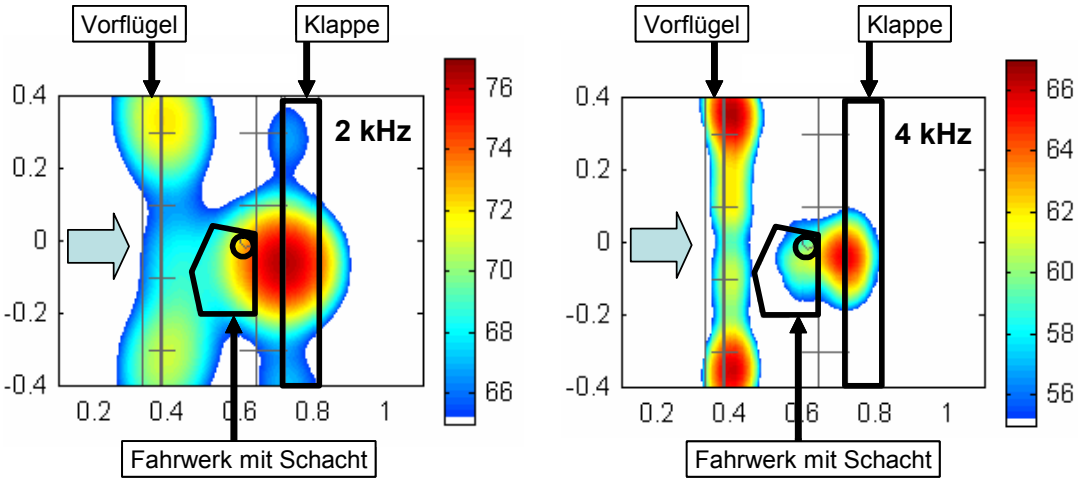


Abbildung 5-10: Beispiele von Schallquellverteilungen am generischen Modell (Blick von unten und Strömung von links) mit simuliertem Fahrwerk und Schacht für die Terzfrequenzbänder 2 kHz und 4 kHz (Array-Messungen durch das NLR)

5.3.4. Validierungsmessungen

Zur Absicherung der Übertragbarkeit von Messergebnissen aus Windkanalversuchen sind Vergleiche mit Lärmmessdaten aus Überflugversuchen unerlässlich. Zu solchen Versuchen ergab sich im Laufe des Projekts die Möglichkeit einer Zusammenarbeit mit der Deutschen Lufthansa, die Lärmmessungen zur Demonstration der Wirkungen nachrüstbarer Lärmminderungsmaßnahmen durchführen wollte. Hier zeigte sich eine unerwartete Übereinstimmung in den jeweils gewünschten Messrandbedingungen:

- Flugversuchsträger A319 (baugleicher Flügel wie A320) entsprechend den untersuchten Windkanalmodellen.
- Nachrüstbare Lärmminderungsmaßnahmen wurden aus Vorkenntnissen und den im Projekt erworbenen Kenntnissen definiert und waren geeignet, „konstruktionsbedingte“ Zusatzschallquellen zum Teil zu beseitigen, so dass das Umströmungsgeräusch des realen Flugzeugs besser mit dem eines idealisierten Modells vergleichbar sein würde (siehe hierzu auch Ergebnisse aus 5.3.2.1).

Zur Erstellung eines Basisdatensatzes für den Vergleich mit Windkanalmessergebnissen enthielt der Versuchsplan Messungen mit minimaler Triebwerksleistung (flight-idle) und verschiedenen Klappenstellungen, mit ein- oder ausgefahrenem Fahrwerk, bei jeweils verschiedenen Fluggeschwindigkeiten. Der gleiche Versuchsplan wurde an zwei aufeinander folgenden Tagen jeweils einmal für die Ausgangskonfiguration des Airbus A319 und sodann für die

mit Lärmminderungsmaßnahmen veränderte Flugzeugkonfiguration abgearbeitet. Lärmminderungsmaßnahmen an der Zelle waren das Abdichten von Löchern und Hohlräumen an Fahrwerkskomponenten und in den Tragflächen, um die Vorflügelhalter und in den Klappenseitenkanten.

Lufthansa stellte im Anschluss an die Flugversuche die Flugdatenaufzeichnungen für die Auswertung der Lärmmessungen zur Verfügung. Messmikrofone waren unter der Flugbahn angeordnet aber insbesondere auch auf verschiedenen Positionen zu beiden Seiten der Flugbahn, um auch die laterale Richtcharakteristik der Schallabstrahlung zu erfassen. Basierend auf den Flugbahndaten wurden die verschiedenen Einflüsse der Relativbewegung des Flugzeugs gegenüber den Mikrofonen auf das akustische Messsignal korrigiert (z.B. Doppler Effekt, konvektive Verstärkung, etc.). Auf diese Weise kann die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung auf einer Kugeloberfläche mit dem Einheitsradius von 1 m als stationäre „Quellcharakteristik“ für jede der vermessenen Flugzeugkonfigurationen angegeben und zur Validierung der im Windkanal ermittelten Charakteristika des Umströmungslärms von Hochauftriebssystemen herangezogen werden.

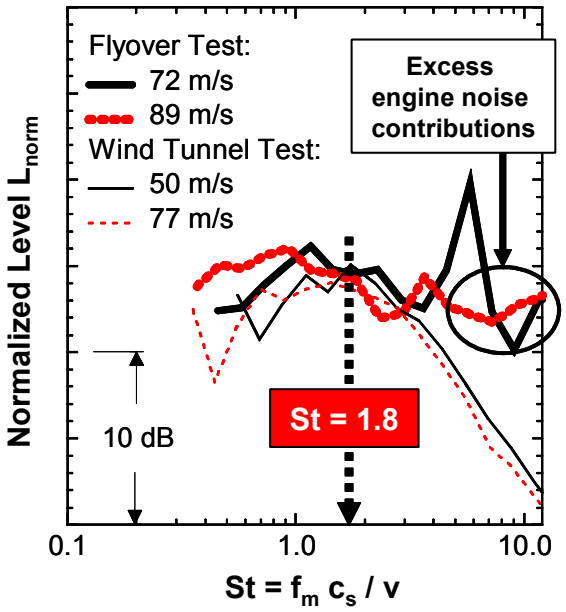


Abbildung 5-11: Vergleich normierter Umströmungsgeräuschspektren aus Windkanal- und Überflugmessungen (für den Überflugpunkt entsprechend einem Abstrahlwinkel von 90°)

Zum Vergleich von Lärmdaten für den A320/A319 aus Windkanal- und Flugversuchen wurden beide Datensätze entsprechend den im vereinfachten Quellmodell (Ergebnisse aus 5.3.2.2) verankerten Parameterabhängigkeiten normiert. Abb. 5-11 zeigt den Vergleich der Terzpegelspektren aus Windkanal- und Flugversuch für den senkrechten Überflugpunkt. Für den Bereich kleiner Strouhal-Zahlen zwischen 1 bis 3 ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Messergebnisse, während bei großen Strouhal-Zahlen (Frequenzen) das Umströmungsgeräusch im Fluge immer noch vom Triebwerkslärm überdeckt wird. Den Vergleich der polaren Abstrahlrichtcharakteristika aus Windkanal- und Flugversuch zeigt Abb. 5-12 für die vom Vorflügellärm bestimmten Pegel bei einer Strouhal-Zahl von 1,8. Es zeigt sich gute Übereinstimmung sowohl hinsichtlich des absoluten Pegels als auch der Richtwirkung [5-15].

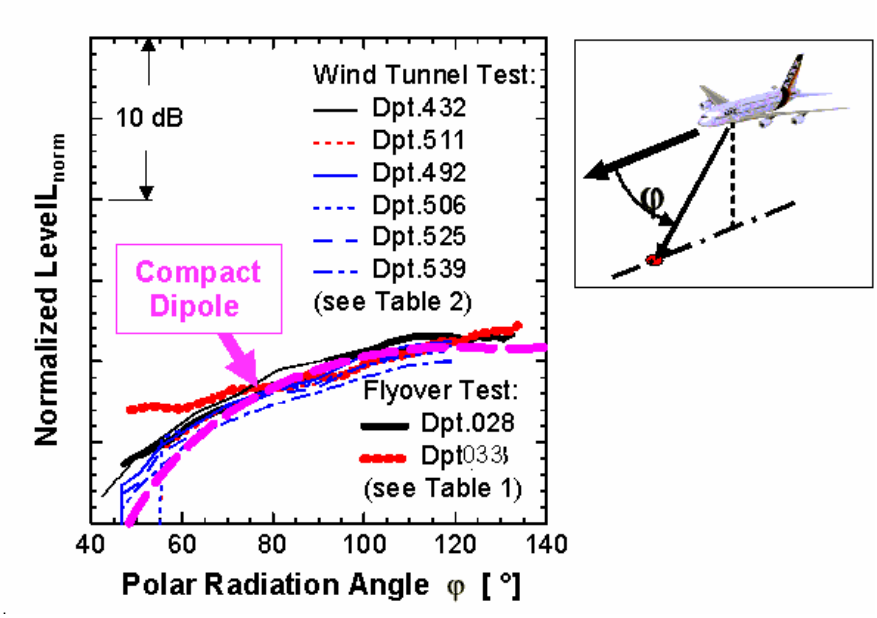


Abbildung 5-12: Vergleich normierter, polarer Abstrahlrichtcharakteristika aus Windkanal- und Überflugmessungen mit dem Ergebnis einer Simulationsrechnung mit dem Dipolquellmodell (für eine Strouhal-Zahl von 1.8)

Unter den verschiedenen für den Flugversuch realisierten Modifikationen an Zellenkomponenten war eine besonders wirkungsvoll: Die intensive Tonerzeugung durch überströmte Druckausgleichsöffnungen in der Flügelunterseite konnte vollständig unterdrückt werden. Dies gelang durch die Erzeugung von Längswirbeln stromauf der Druckausgleichsöffnung mittels kleiner Wirbelgeneratoren, die zuvor im Rahmen der Lärmmessungen am A320 Originalflügel im DNW-LLF erfolgreich getestet worden waren.

5.4. Zusammenfassung

Zur Minderung des Fahrwerkslärms wurden für die Nachrüstung bei heutigen Fahrwerken geeignete, aerodynamische Teilverkleidungen von komplexen Fahrwerkskomponenten erprobt und entsprechend der Zielsetzung ein Lärmminderungspotenzial von 3 dB nachgewiesen. Auf der Basis der Windkanalmessergebnisse wurde ein empirisches Quellmodell für das Fahrwerksgeräusch entwickelt. Die wesentlichsten Lärmquellen heutiger Hochauftriebssysteme wurden identifiziert. Der Vorflügel stellt die bedeutendste Umströmungslärmquelle dar. Die Lärmentstehungsmechanismen am Vorflügel sind zwar noch nicht endgültig geklärt, jedoch weisen alle Ergebnisse aus Windkanalversuchen auf die Dominanz von Hinterkantenlärm als dem entscheidenden Lärmmechanismus hin. Ein entsprechendes Quellmodell wurde durch Überflugmessungen validiert und Modifikationen der Vorflügelhinterkante erbrachten das angestrebte Lärmminderungspotenzial von 3 dB. Neben dem Lärm durch die Umströmung der Fahrwerke und Hochauftriebshilfen stellt die Interaktion des Fahrwerksnachlaufs mit der ausgefahrenen Landeklappe eine bedeutsame weitere Strömungslärmquelle im Landeanflug dar.

Damit wurden nahezu alle Projektziele erreicht. Lediglich die vollständige Aufklärung der Mechanismen von Tonquellen am Vorflügel und der Lärmminderungswirkung strömungsdurchlässiger Abströmkanten an Auftriebsflächen bedarf noch weiterer Arbeiten.

5.5. Schrifttum

[5-1] Dobrzynski, W.: “Wind Tunnel Experiments Dedicated to Airframe Noise Reduction”, DGLR Workshop on Aeroacoustics in Aeronautics - Contributions of Wind Tunnels, 18-19 April, DNW/The Netherlands, 2000.

[5-2] Dobrzynski, W., Chow, L. C., Guion, P., Shiells, D.: A European Study on Landing Gear Airframe Noise Sources, 6th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 12-14 June, Lahaina Hawaii/USA, 2000.

[5-3] Dobrzynski, W., Gehlhar, B., Buchholz, H.: “Model- and Full Scale High-Lift Wing Wind Tunnel Experiments Dedicated to Airframe Noise Reduction”, 7th International Congress on Sound and Vibration, 4-7 July, Garmisch-Partenkirchen/Germany, 2000.

[5-4] Dobrzynski, W., Gehlhar, B.: „Zusatzflügel für Hauptflügel von Flugzeugen – Vorflügelumströmung“, Deutsche Patentanmeldung 199 25 560.1-22.

[5-5] Dobrzynski, W., Gehlhar, B., Buchholz, H.: „Windkanalstudien zur Eigengeräuschminderung an Verkehrsflugzeugen“, Abschlussbericht an den Auftraggeber: DLR-IB 129-00/11, Braunschweig, 2000.

[5-6] Heller, H., Dobrzynski, W.: “Airframe Noise Generation and Reduction - Status and Perspectives of DLR-Research”, AG STAB-Symposium 2000, November 16-17, IAG, Universität Stuttgart, 2000.

[5-7] Dobrzynski, W.: “State of the experimentally obtained knowledge of airframe noise”, Second Aeroacoustics Workshop SWING, October 6-7, DLR/Braunschweig, 2000.

[5-8] Dobrzynski, W., Delfs, J.: „Flugzeugeigengeräusch - Entstehung und Minderung“,.Seminar “Umweltschutz bei Wehrmaterial Luft”, Eingeladener Vortrag in der Bundesakademie für Wehrverwaltung und Wehrtechnik, Mannheim, 22.11.2000.

[5-9] Dobrzynski, W., Gehlhar, B., Buchholz, H.: “Model and full scale high lift wing wind tunnel experiments dedicated to airframe noise reduction”, Aerosp. Sci. Technol. 5 (2001), pp. 27- 33, 2001.

[5-10] Dobrzynski, W., Pott-Pollenske, M.: “Slat Noise Source Studies for Farfield Noise Prediction”, 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht/The Netherlands, May 28-30, 2001.

[5-11] Dobrzynski, W., Gehlhar, B., Buchholz, H.: “RAIN Task 3.2: High Lift Devices Noise Reduction Study - A320 Full-scale Wing in DNW-LLF”, DLR IB 129-01/18, Braunschweig 2001.

[5-12] Dobrzynski, W.: „Stand der Fluglärmforschung - Nationale und Internationale Forschungsvorhaben“, Eingeladener Vortrag zum DGLR-Workshop: “Reduzierung des Fluglärms - Wo liegen die Ziele und Grenzen der Machbarkeit”, Frankfurt, 30.11.2001.

[5-13] Dobrzynski, W.: „Lärmminderung an der Quelle - Technische Entwicklungen“, Eingeladener Vortrag zum Seminar Umweltrecht, Universität Hamburg, 10. Juni, 2002.

[5-14] Dobrzynski, W., Chow, L. C., Guion, P., Shiells, D.: “Research into Landing Gear Airframe Noise Reduction”, AIAA 2002-2409, 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Breckenridge, Colorado/USA, June 17-19, 2002.

[5-15] Pott-Pollenske, M., Dobrzynski, W., Buchholz, H., Gehlhar, B., Walle, F.: “Validation of a Semiempirical Airframe Noise Prediction Method through Dedicated A319 Flyover Noise Measurements”, AIAA 2002-2470, 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Breckenridge, Colorado/USA, June 17-19, 2002.

[5-16] Chow, L. C., Dobrzynski, W.: “Landing Gears Airframe Noise Research Study”, 9th International Congress on Sound and Vibration, Orlando, Florida/USA, July 8-11, 2002.

[5-17] Mau, K., Dobrzynski, W.: „Anordnung zur Minderung des aerodynamischen Lärms an einem Vorflügel eines Verkehrsflugzeuges“, Deutsche Patentanmeldung 101 57 849.0

[5-18] Alvarez-Gonzalez, J.: „Prognoseverfahren für den Umströmungslärm von Flugzeugfahrwerken“, DLR IB 124-02/30, Braunschweig, 2002.

[5-19] Dobrzynski, W.: „Vereinfachtes Prognosemodell für den Hochauftriebslärm“, DLR IB 124-03/25, Braunschweig, Juli 2003.

[5-20] Dobrzynski, W.: “Assessment of slat and flap side-edge noise reduction potential from farfield noise measurements”, Confidential SILENCER project report, DLR IB 124-03/40, Braunschweig, December 2003.

[5-21] Pott-Pollenske, M., Alvarez-Gonzalez, J., Dobrzynski, W.: “Effect of Slat Gap on Farfield Radiated Noise and Correlation with Local Flow Characteristics”, AIAA 2003-3228, 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Hilton Head, South Carolina/USA, May 12-14, 2003.

6. Lärmarme Flugverfahren

Hauptarbeitspaket 3: ***Dr. Reinhard König, E-Mail:*** reinhard.koenig@dlr.de
DLR-Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig

Raimar Stump, E-Mail: raimar.stump@dlr.de
DLR-Institut für Flugführung, Braunschweig

6.1. Forschungsziel

Im Rahmen des Hauptarbeitspakets 3 sollten die folgenden Ziele erreicht werden:

- Definition verbesserter Flugverfahren unter Berücksichtigung der Einflüsse auf Sicherheit, Arbeitsbelastung der Piloten, Passagierkomfort und Treibstoffverbrauch.
- Bewertung der verbesserten Verfahren hinsichtlich ihres Lärmminderungspotentials gegenüber den Referenzverfahren (Einsatz von Rechnersimulationen und Flugversuchen zur Klärung flugbetrieblicher Probleme). Optimierung für den Nachtflugbetrieb.
- Erstellung von Konzepten zur Integration verbesserter Verfahren in moderne Air Traffic Management Systeme.

Insbesondere beim Anflug sollte im erweiterten Flughafenbereich durch verbesserte Verfahren eine Minderung der Lärmbelastung um 3 dB erreicht werden. Beim Abflug wurden Möglichkeiten zu einer lokalen Optimierung der Lärmbelastung durch geeignete Streckenführung und Navigation untersucht.

Formelzeichen

C_A	Auftriebsbeiwert
C_W	Widerstandsbeiwert
F_{max}	Maximalschub
F_{req}	Erforderlicher Schub
F_{idle}	Leerlaufschub
G	Gewichtskraft
g	Erdbeschleunigung
$\dot{H}$	Steigrate
V	Fluggeschwindigkeit
$\dot{V}$	Zeitliche Änderung der Fluggeschwindigkeit
V_X	Geschwindigkeit des steilsten Steigfluges
V_Y	Geschwindigkeit der maximalen Steigrate
W	Widerstand

Abkürzungen

AGL	Above Ground Level
ATA	Air Transport Association
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CDA	Continuous Descent Approach
DLH	Deutsche Lufthansa AG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOC	Direct Operating Costs
FAA	Federal Aviation Administration
FMS	Flight Management System
ft	Fuß (= 0,3048 m)
IAH	Intermediate Acceleration Height
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
INM	Integrated Noise Model
kts	Knoten (= 0,5144 ms^{-1})
LAMAX	(A) bewerteter Maximalschallpegel
LDLP	Low Drag Low Power Approach
MONA	Modern Noise Abatement Procedure
nm	Nautische Meile (= 1852 m)
PANS-OPS	Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations
SEL	Sound Exposure Level
SOP	Standard Operating Procedures
SOURDINE	Study of optimisation procedures for decreasing the impact of noise around airports

6.2. Lärmoptimierte Abflugverfahren

6.2.1. Randbedingungen

Der Wunsch nach rascher Entwicklung von verbesserten, lärmgünstigeren Abflugverfahren resultiert aus den hohen Anforderungen für die Zulassung von Hard- und Softwarekomponenten für Luftfahrtanwendungen. Dies gilt sowohl bord- als auch bodenseitig. Hinzu kommen Dienstzeiten von heutigen Verkehrsflugzeugen mit bis zu 30 Jahren und mehr, so dass Verbesserungen erst in Jahrzehnten wirksam werden.

Diese Randbedingung erfordert Flugverfahren, welche mit dem heutigen Ausrüstungsstand auskommen. Derartige Verfahren können als wirklich kurzfristige Alternativen zu den aktuellen Verfahren angesehen werden und innerhalb relativ kurzer Zeit (Größenordnung 5 Jahre ab heute) eingesetzt werden.

Hinzu kommen weitere Anforderungen, welche im folgenden kurz erläutert werden:

6.2.1.1. Sicherheit

Im Gegensatz zur Landung werden beim Start die Triebwerke bis an ihr Maximum belastet. Lang andauernde Flugphasen unter voller Schubbelastung beanspruchen die einzelnen Komponenten der Triebwerke erheblich, reduzieren deren Lebensdauer und, besonders sicherheitsrelevant, erhöhen das Risiko eines Triebwerksausfalls im Fluge. Abflugverfahren mit reduziertem Startschub und/oder baldiger Schubreduktion auf Steigflugtriebwerksleistung sollten daher verstärkt untersucht werden.

Start und Steigflug sind Flugphasen, in welchen 24% aller Unfälle (Takeoff 11%, Initial Climb 5%, Climb with Flaps Up 8%) von kommerziellen Strahlverkehrsflugzeugen vorkommen. [6-1]. Ebenfalls werden 67% aller Totalverluste auf die Cockpitbesatzung als primäre Fehlerquelle zurückgeführt. Neuartige Verfahren dürfen aus diesem Grund keinesfalls die Arbeitsbelastung während dieser Flugphase derart erhöhen, dass die Piloten bis an ihre Leistungsgrenzen beansprucht werden.

Airline Standard Operating Procedures (SOP’s) wurden entwickelt, um eine Reduzierung der Arbeitsbelastung (Crew Coordination Concept), Standardisierung der Arbeitsabläufe und Verbesserung der Kommunikation im Cockpit (Crew Resource Management) zu gewährleisten. Die Berücksichtigung dieser sicherheitskritischen Faktoren sollte auch durch zukünftige Verfahren sichergestellt werden.

6.2.1.2. Flugsicherung

Um die angespannte Verkehrssituation an Großflughäfen wie z.B. Frankfurt oder München nicht weiter zu belasten, ist es besonders für den Flugbetrieb am Tage wichtig, dass neuartige Verfahren den Verkehrsfluss fördern und keine weiteren Engpässe generieren, um die mögliche Anzahl an Flugbewegungen pro Stunde nicht weiter einzuschränken.

Verfahren mit hohem zeitlichem Bedarf, bedingt durch verringerte Fluggeschwindigkeiten sollten daher a priori nur für eventuellen Nachtflugbetrieb untersucht und optimiert werden. Der Tagflugbetrieb erfordert einen gangbaren Kompromiss zwischen Lärmeinsparung und Erhaltung der Verkehrskapazitäten.

6.2.1.3. Ökonomische Durchführbarkeit

Bei der Auslegung moderner lärmmindernder Abflugverfahren sollten einige Randbedingungen berücksichtigt werden, um eine wirtschaftliche Durchführung des Fluges seitens der Fluggesellschaften zu ermöglichen und keinen weiteren Kostendruck auf die Airlines auszuüben.

Die Kosten für Treibstoff bei großen Fluggesellschaften betragen erfahrungsgemäß je nach Rohölpreis zwischen 18 und 26% der direkten Betriebskosten (Direct Operating Costs DOC’s) oder bezogen auf den jährlichen Umsatzerlös z.B. bei Lufthansa im Jahr 2001 ca. 9,7% [6-2]. Eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs während der Startphase wäre sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht wünschenswert, um die Schadstoff-Emissionsbilanz weiter zu verbessern.

Neben den bereits erwähnten sicherheitskritischen Aspekten, ist die Nutzung von Triebwerken bei reduziertem Startschub bzw. kurzen Flugphasen unter Vollschub auch wirtschaftlich sinnvoll, da dies die Lebensdauer der Triebwerke deutlich erhöht und längere Wartungsintervalle ermöglicht.

Im Kurzstreckenflugbetrieb sind bis zu acht Flugabschnitte pro Crew und Einsatztag durchaus üblich. Abflugverfahren mit erhöhtem zeitlichen Mehrbedarf können sich durch die gesetzlichen Regelungen über maximal mögliche Flugdienstzeiten an dieser Stelle auf kumulativer Basis negativ auf die erzielbare Anzahl von Flugabschnitten pro Creweinsatz auswirken.

6.2.1.4. Gesetzliche Randbedingungen

In den kürzlich erweiterten ICAO PANS-OPS [6-3] werden die gesetzlichen Randbedingungen bezüglich der Auslegung und Durchführung von lärmarmen Abflugverfahren detailliert beschrieben. Gegenüber früheren Vorschriften, welche zwei genau definierte Abflugverfahren vorsahen, ermöglichen die neuen Richtlinien ein flexibleres Design und werden lediglich durch folgende Forderungen auf Grund von Sicherheitsbedenken eingeschränkt:

- Die minimal mögliche Flughöhe für Schubreduktionen von Start- auf Steigflugschub ist 800 ft über Grund
- Das Schubniveau nach erfolgter Reduktion darf nicht geringer sein, als jenes Niveau, welches notwendig ist, um die in den Zulassungsbestimmungen geforderte minimale Steigrate bei Ausfall eines Triebwerks zu erreichen.
- Von den Fluggesellschaften wird erwartet, sich auf ein den Richtlinien entsprechendes Abflugverfahren festzulegen und nur dieses lärmarme Verfahren neben ihrem Standardverfahren im Flugbetrieb einzusetzen.

6.2.2. Grundlagen

Vor der Optimierung von Abflugverfahren sollte eine Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die zu erwartenden Flugleistungen erfolgen. Die erzielbaren Steigleistungen eines Flugzeuges können durch den Steigwinkel und die Steigrate (Steiggeschwindigkeit) wiedergegeben werden [6-4].

$$\sin(\gamma) = \frac{F_{max} - W}{G} - \frac{\dot{V}}{g} \tag{6-1}$$

$$\dot{H} = V \sin(\gamma) \tag{6-2}$$

Beide Parameter sind von mehreren Größen wie z.B. Fluggeschwindigkeit, Beschleunigung, Flughöhe, Gewicht, Konfiguration, Schub, Wind und Temperatur abhängig.

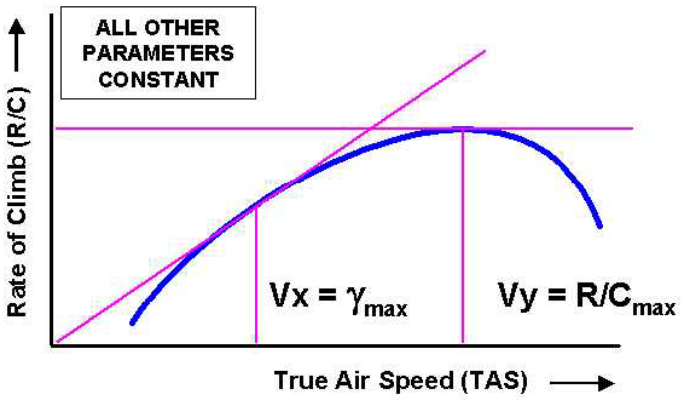


Abbildung 6-1: Steigrate über Geschwindigkeit

Aus Abbildung 6-1 folgt die Abhängigkeit von Steigrate und Fluggeschwindigkeit. Zwei charakteristische Geschwindigkeiten sind gekennzeichnet:

- Geschwindigkeit des maximalen Steigwinkels V_X
- Geschwindigkeit der maximalen Steigrate V_Y

Während V_Y als Geschwindigkeit des schnellsten Steigens zeit- und treibstoffsparend ist und die Kapazitäten an Flugbewegungen pro Stunde erhöht, kann V_X als steilstes Steigen beson-

ders lärmgünstig eingestuft werden, da bei dieser Geschwindigkeit die Distanz zum Beobachter am Boden maximiert und damit die Schallimmission abnimmt.

6.2.3. Optimierungsansatz

Während Start und Steigflug ändern sich beide Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der eingangs beschriebenen Faktoren.

Abbildung 6-2 zeigt den simulierten Höhen- und Geschwindigkeitsverlauf bei Durchführung zweier üblicher Abflugverfahren: der „modified ATA-Procedure“ und der „ICAO-A-Procedure“ (auch als IATA-Procedure bekannt).

Zusätzlich wurde in beiden Simulationen für den jeweiligen Flugzustand V_X und V_Y berechnet, um den Verlauf beider Geschwindigkeiten bzw. die Abweichung der tatsächlichen Fluggeschwindigkeit von V_X bzw. V_Y darzustellen. Aus den Zeitverläufen ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit nicht den sprungartigen, wenn auch optimalen, Verläufen von V_X und V_Y folgen kann.

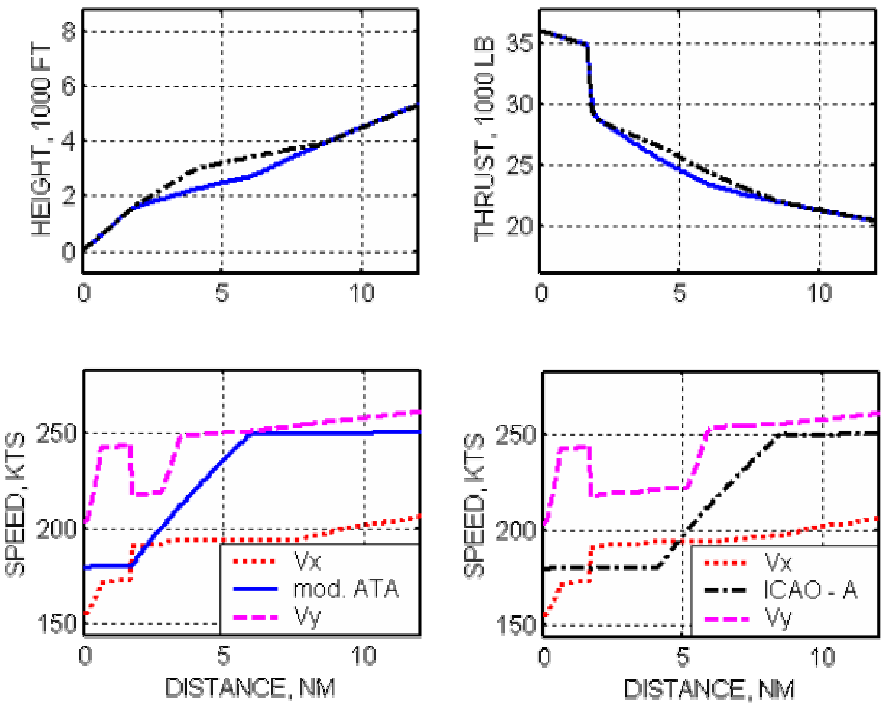


Abbildung 6-2: Analyse von Abflugverfahren bezüglich V_x bzw. V_y

Unter Beachtung der in Kap. 6.2.1 beschriebenen Randbedingungen sollte ein Kompromiss gefunden werden, welcher sowohl Lärmreduzierung und dementsprechende Optimierung nach V_X als auch ökonomische Durchführbarkeit unter Einhaltung der sicherheitskritischen und gesetzlichen Randbedingungen gewährleistet, ohne dabei die Pilotenbelastung stark zu erhöhen.

Bezüglich der Pilotenbelastung ist anzumerken, dass eine Erhöhungen durch Auslegung der Verfahren in Anlehnung an die Standard-Betriebsverfahren der Deutschen Lufthansa (DLH) zu vermeiden versucht wird. Für endgültige Aussagen zu diesem Punkt wären jedoch Simulatorstudien unter der Beteiligung von Linienpiloten notwendig.

6.2.4. Ergebnis

Sowohl die Lärmberechnungen mit dem Integrated Noise Model INM (FAA-Entwicklung) als auch mit SIMUL (DLR-Entwicklung) zeigen die erwartete Dominanz des Triebwerksgeräusches gegenüber dem Umströmungsgeräusch der Flugzeugzelle, was sich beim Landeanflug durchaus umkehren kann. Durch den vernachlässigbaren Anteil des Umströmungslärms ergeben sich zwei Einflussgrößen zur Reduktion der Lärmimmission von Abflugverfahren:

- Reduktion des Schubniveaus
- Maximierung der Distanz zwischen Quelle und Beobachter

Simulationen für Startverfahren mit reduziertem Startschub zeigten nur in unmittelbarer Nähe (kann in den meisten Fällen als Position noch auf dem Flugplatz angenommen werden) zum Abhebepunkt Lärmreduktionen, während, auf Grund der verringerten Steigleistung, die verbleibende Abflugstrecke deutlich höhere Lärmimmissionen aufwies. Die Berechnungen mit reduziertem Startschub sollen jedoch nicht den aus der Praxis bekannten „Flex-Takeoff-Thrust“-Anwendungen verwechselt werden. Diese Startschubreduktion wird angewendet, wenn ein geringeres als das maximal zulässige Startgewicht vorliegt. Durch die Reduktion werden in diesem Fall die Flugleistungsdaten soweit eingeschränkt, bis analoges Verhalten zum Flugbetrieb mit maximaler Abflugmasse und Vollschub vorliegt. Daraus resultieren bei gleicher Distanz zum Beobachter verringerter Triebwerkslärm und verringerte Schadstoffemissionen

Lange Steigphasen mit konstanter Geschwindigkeit in Umgebung von V_x und spätes Beschleunigen bergen großes Lärmminderungspotential, welches durch verlängerte Flugzeiten und erhöhten Treibstoffverbrauch erkauft wird.

Um den kapazitätsbezogenen und wirtschaftlichen Randbedingungen zu entsprechen, sollte die Beschleunigungsphase von der anfänglichen Steiggeschwindigkeit (üblicherweise ~$V2$+10 kts) in Umgebung von V_X zur Reisesteigfluggeschwindigkeit (~V_Y) möglichst rasch erfolgen. Aufgrund von gesetzlichen Regelungen sind Geschwindigkeiten größer als 250 kts im unteren Luftraum bis Flugfläche 100 (~3000 m) verboten.

Durch die zusätzliche Bedingung ein möglichst rasch, mit heutigen Mitteln, einsetzbares Verfahren zu bekommen, sollte der Abflug sowohl automatisch als auch manuell durchführbar sein. Daher erfolgte die Vorgabe der Beschleunigungswerte, nach Abschluss der Anfangssteigphase mit konstanter Geschwindigkeit, indirekt über verringerte Steigraten, bis zum Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit von 250 kts.

Als neue Variante („**MO**dern **N**oise **A**batement Departure Procedure“ **MONA-Departure**) zu bestehenden Verfahren wurde eine „Zwischenbeschleunigungsphase“ eingeführt, welche direkt an die erste Flugphase mit gleich bleibender Geschwindigkeit anschließt und mit mäßig reduzierter Steigrate durchgeführt wird, um eine geringe Beschleunigung zu erzielen.

Nach Erreichen der Zwischenbeschleunigungshöhe (Intermediate Acceleration Height, IAH) wird die Steigrate weiter reduziert, um höhere Beschleunigungswerte zu erreichen.

Abbildungen 6-3 und 6-4 zeigen die Auswirkungen einer Anhebung der Zwischenbeschleunigungshöhe von 3000 ft auf 5000 ft über Grund. Dargestellt sind Höhen- und Geschwindigkeitsverläufe, als auch die Differenzen der Maximalschallpegel (LAMAX) bzw. Dauerschallpegel (Sound Exposure Level SEL) bezogen auf das Referenzverfahren „modified ATA“.

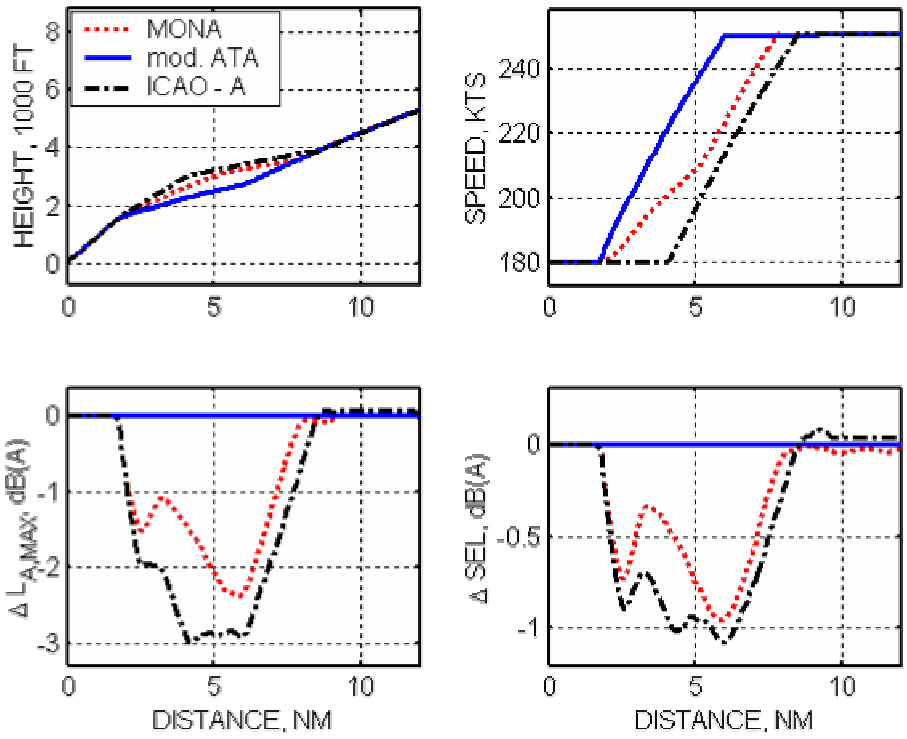


Abbildung 6-3: Vergleich des „MONA-Verfahrens“ (Zwischenbeschleunigungshöhe 3000 ft) mit der „mod. ATA-Procedure“ und „ICAO-A-Procedure“

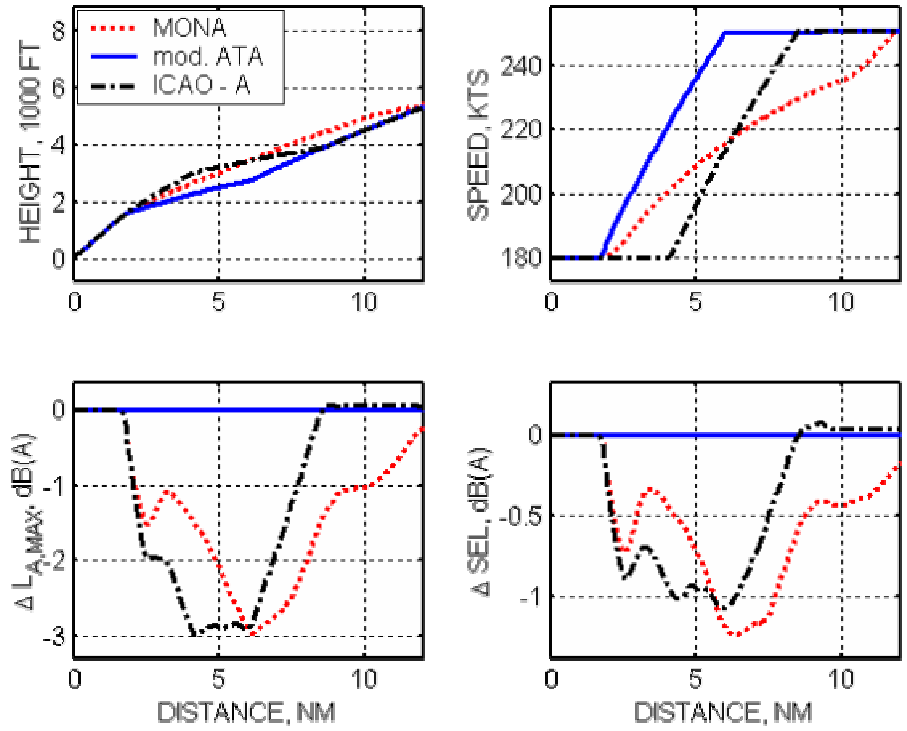


Abbildung 6-4: Vergleich des „MONA-Verfahrens“ (Zwischenbeschleunigungshöhe 5000 ft) mit der „mod. ATA-Procedure“ und „ICAO-A-Procedure“

Die Einführung dieser Zwischenbeschleunigungsphase bringt folgende Vorteile mit sich:

- In einem Bereich von 4 bis 15 km (entsprechen 2 bis 8 nm) nach dem Startpunkt ist die Distanz zwischen Beobachter und Schallquelle höher als bei bisherigen Verfahren wie z.B. dem mod. ATA-Procedure und somit eine geringere Lärmimmission am Boden vorhanden.
- Frühere Beschleunigungsphasen als bei aktuellen lärmgünstigen Verfahren wie z.B. dem ICAO-A-Procedure reduzieren sowohl Treibstoff- als auch zeitlichen Bedarf des Verfahrens.
- Nennenswerte Erhöhungen der Pilotenbelastung finden nicht statt, da lediglich eine weitere Höhe beachtet werden muss, bei welcher die Zwischenbeschleunigungsphase abschließt und die Endbeschleunigung durchgeführt wird. Das Verfahren ist sowohl manuell als auch halbautomatisch über das zeitgerechte Wählen von Steigraten fliegbar.
- Durch flughafenspezifische Wahl der Zwischenbeschleunigungshöhe (je nach lokaler Bevölkerungsverteilung, z.B. in direkter Umgebung zum Flughafen oder in weiterer Entfernung) sind Anpassungen der Lärmimmissionen möglich.
- Weitere Lärmreduktionen sind durch zusätzliche Anhebung der Höhe der Schubreduktion von Start- auf Reisesteigflugschub, bei ähnlichem Treibstoff- und Zeitbedarf möglich.

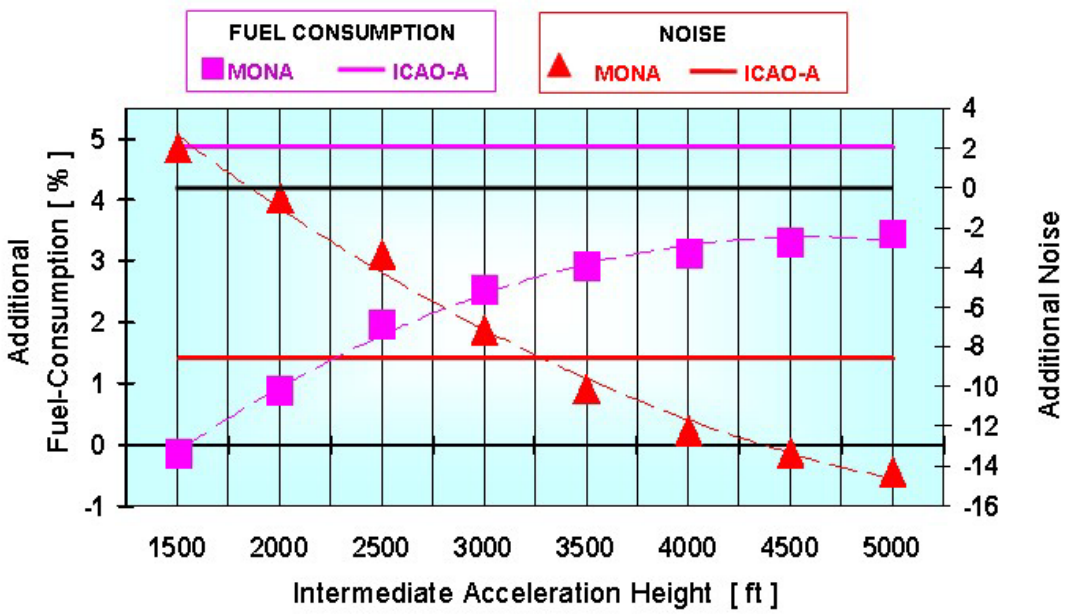


Abbildung 6-5: Lärm und Treibstoffverbrauch bis zum Erreichen von 6000 ft und 250 kts bezogen auf “Modified ATA“.

Das Abbildung 6-5 zeigt für verschiedene Zwischenbeschleunigungshöhen den zusätzlichen Treib-stoffverbrauch von MONA (Magenta Quadrate) und ICAO-A (Magenta Linie) gegenüber MOD-ATA. Bei Zunahme der Zwischenbeschleunigungshöhe nimmt der zusätzliche Treibstoffverbrauch bei MoNa zu, erreicht aber nicht den Wert von ICAO-A. Ebenfalls aufgetragen ist eine Masszahl für den Lärm. Diese nimmt wie zu erwarten mit zunehmender Zwischenbeschleunigungshöhe bei MONA (Rote Rechtecke) ab. Bei ca. 3500 ft IAH wird der konstante Wert von ICAO-A (Rote Linie) erreicht. Es ist also gegenüber gegenüber ICAO-A gleiches Lärmverhalten möglich, wobei die prozentuale Zunahme des Treibstoffverbrauchs nur 50% der von ICAO-A ausmacht. Für grössere

Zwischenbeschleunigungshöhen erreicht man mit MONA sogar weitere Lärmreduktionen, ohne dass der zusätzliche Treibstoffverbrauch den Wert von ICAO-A erreicht.

Als weitere kurzfristig einsetzbare Variante zur Reduktion der Lärmimmission bei Abflugverfahren wird in SOURDINE [6-5] nach anfänglicher Reduktion auf den minimal notwendigen Schub zur Einhaltung der gesetzlich geforderten Mindeststeigraten eine sukzessive Erhöhung des Schubes in 5 Stufen auf maximal zulässigen Steigflugschub vorgeschlagen. Da heutige im Einsatz befindliche Vortriebsregler (Autothrottle) für eine Schuberhöhung auf dieser Basis nicht ausgelegt sind und keine Möglichkeit zur Programmierung dieser Werte in das Flight Management System (FMS) vor dem Start vorgesehen ist, müssen diese Schuberhöhungen von Hand durch die Piloten durchgeführt werden. Im Hinblick auf die Pilotenbelastung in dieser kritischen Flugphase mit allgemein hoher Arbeitsbelastung werden ähnliche Verfahren zur Anpassungen des Schubniveaus in der vorliegenden Untersuchung bewußt nicht vorgeschlagen, um die kurzfristige Einsetzbarkeit und Akzeptanz der Verfahren bezüglich Sicherheitsbedenken seitens der Fluggesellschaften und des Cockpitpersonals nicht zu gefährden.

Ebenfalls wird aus den Erkenntnissen von SOURDINE deutlich, dass es kein allgemein gültiges Verfahren gibt, mit welchem sowohl zweistrahlige Verkehrsflugzeuge mittlerer Größe (z.B. A320) als auch vierstrahlige Großraumflugzeuge (z.B. A340) einen lärmoptimierten Abflug durchführen können. Für Langstreckenflugzeuge werden zwei verschiedene Verfahren vorgestellt, geeignet zur Lärmreduktion jeweils für Gebiete in direkter Umgebung zum Flughafen bzw. in weiterer Entfernung. Als direkte Folge dieser Untersuchungen ergibt sich ein Konflikt mit den Richtlinien ICAO-PANS-OPS, welche fordern, dass Fluggesellschaften möglichst ein einziges optimiertes Verfahren definieren und im täglichen Flugbetrieb anwenden sollten.

6.3. Lärmoptimierte Anflugverfahren

6.3.1. Randbedingungen

Insbesondere kurzfristig einsetzbare, lärmreduzierte Alternativen zu den herkömmlichen Anflugverfahren dürfen, wie auch die entsprechenden Abflugverfahren, keine Erweiterung des heutigen Ausrüstungszustandes im Flugzeug und am Boden erfordern. Die vollständige Nutzung des Leistungsumfanges von Flight Management System und Autopilot wird jedoch zwingend notwendig.

6.3.1.1. Sicherheit

Der Landeanflug zeichnet sich dadurch aus, dass unter Einhaltung eines sicheren Flugzustandes die Schwelle der Landebahn mit einer vorgegebenen Fluggeschwindigkeit erreicht werden muss. Ausgehend vom Reiseflug bedeutet das, dass sowohl potentielle, als auch kinetische Energie abgebaut werden müssen.

Die Flugphasen Anflug und Landung beinhalten 59% aller Unfälle von kommerziellen Strahlverkehrsflugzeugen (Initial Approach 5%, Final 7%, Landing 47%) [6-1]. Die Arbeitsbelastung der Cockpitbesatzung ist während der Annäherung an den Boden und beim anschließenden Aufsetzen und Abbremsen sehr hoch. Zusätzliche Arbeitsbelastungen durch modifizierte Anflugverfahren sind deshalb unter allen Umständen zu vermeiden.

6.3.1.2. Flugsicherung

Die aus Gründen der Kapazitätsauslastung gewünschte enge Staffelung ankommender Flugzeuge erfordert eine möglichst genaue Bestimmung ihrer Ankunftszeit. Wenn bei geänderten Anflugverfahren die Ankunftszeit nur noch mit geringerer Genauigkeit vorhergesagt werden kann, muss aus Sicherheitsgründen die Staffelung heraufgesetzt und damit Kapazitätseinbu-

ßen in Kauf genommen werden. Derartige Verfahren lassen sich jedoch im Nachtflugbetrieb, wenn der Flughafen nicht an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet, einsetzen.

6.3.1.3. Ökonomische Durchführbarkeit

Die auf das Flugzeug bezogene ökonomische Durchführbarkeit spielt beim Anflug im Gegensatz zum Abflug eine untergeordnete Rolle. In der Regel werden lärmreduzierte Anflugverfahren zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauches führen.

6.3.1.4. Gesetzliche Randbedingungen

Die ICAO PANS-OPS [6-3] geben Auskunft über die Randbedingungen zur Auslegung und Durchführung von lärmreduzierten Anflugverfahren. Danach sollte sich das Flugzeug ab "Outer Marker", jedoch mindestens ab 5 nm vor der Schwelle, in Landekonfiguration befinden und darf während des Anflugs keine extremen Sinkgeschwindigkeiten einnehmen. Werden für die Verfahrensauslegung aktuell verfügbare Systeme und Ausrüstungen (Jahr 1982) zugrunde gelegt, dann darf das Verfahren keine Flugbahnwinkel erfordern, die über dem ILS Gleitpfadwinkel liegen. Wenn die Einführung neuer Systeme und Ausrüstungen es jedoch ermöglicht, deutlich abweichende Anflüge durchzuführen, können und sollten die bestehenden Verfahren neu ausgelegt werden.

Des weiteren dürfen lärmreduzierte Anflugverfahren nicht angewandt werden, wenn die Landebahn nicht sauber und trocken ist, die Wolkenuntergrenze bei 500 ft liegt, die Sicht weniger als 1 nm beträgt, die Seitenwindkomponente inkl. Böen mehr als 15 kts ist, die Rückenwindkomponente inkl. Böen mehr als 5 kts beträgt und wenn Windscherungen angekündigt wurden.

6.3.2. Grundlagen

Die flugphysikalischen Grundlagen für den Landeanflug lassen sich aus Widerstands- und Auftriebsdifferenzialgleichung der Flugbewegung herleiten. Unter der Annahme, dass näherungsweise der Auftrieb gleich dem Gewicht ist, gibt Gl. (6-3) Auskunft darüber, welcher Bahnwinkel oder welche Beschleunigung / Verzögerung sich bei vorgegebenem Schub (hier Leerlaufschub F_{idle}) einstellt. Im anderen Fall, wenn Bahn und/oder Beschleunigung/Verzögerung vorgegeben werden, erhält man den notwendigen Schub F_{req} aus Gl. (6-4).

$$\sin(\gamma)+\frac{\dot{V}}{g}=\frac{F_{idle}}{G}-\frac{C_W}{C_A} \tag{6-3}$$

$$\frac{F_{req}}{G}=\frac{C_W}{C_A}+\sin(\gamma)+\frac{\dot{V}}{g} \tag{6-4}$$

Wie auch der Startsteigflug beinhaltet der Landeanflug mehrere Phasen. Am Abstiegspunkt wird das Schubniveau auf bzw. nahe Leerlaufschub verringert und damit der Sinkflug eingeleitet. In dieser ersten Phase verhält sich das Flugzeug analog zu einem Segelflugzeug. Bei konstanter Fluggeschwindigkeit und Leerlaufschub ist das Verhältnis von Widerstandsbeiwert zu Auftriebsbeiwert C_W/C_A größer als das Verhältnis von Leerlaufschub zu Gewicht F_{idle}/G, der Bahnwinkel γ wird negativ (Gl. 6-3). Soll gleichzeitig Fluggeschwindigkeit abgebaut werden, was einer Energieverteilung gleichkommen würde ("energy sharing"), folgt daraus ein flacherer Bahnwinkel.

Beim Erreichen der Zwischenanflughöhe und dem Übergang in den Horizontalflug (γ=0) besteht die Notwendigkeit, den Schub zu erhöhen, es sei denn, es soll weiter Geschwindigkeit abgebaut werden (Gl. 6-4). Im Bereich der Zwischenanflughöhe werden die Landklappen in Anflugkonfiguration gebracht und die Fluggeschwindigkeit weiter abgebaut. Die Länge die-

ses Streckenabschnittes im Horizontalflug wird im wesentlichen durch die Flugsicherung bestimmt. Dies hat zur Folge, dass der Endpunkt eines Geschwindigkeitsabbaues in der Regel nicht mit dem Erreichen des Gleitpfades zusammenfällt, so dass eine Schuberhöhung so gut wie immer erfolgen muss. Verlassen wird die Zwischenanflughöhe mit dem Erreichen des Gleitpfades.

Nach Einflug auf den Gleitpfad und vor Erreichen des "Outer Markers" wird das Fahrwerk ausgefahren und die Landekonfiguration eingenommen. Damit die Landung durchgeführt werden kann, muss das Flugzeug entsprechend den SOP’s in 1000 ft Höhe über Grund einen stabilen Flugzustand, d.h. konstante Fluggeschwindigkeit und Bahn eingenommen haben.

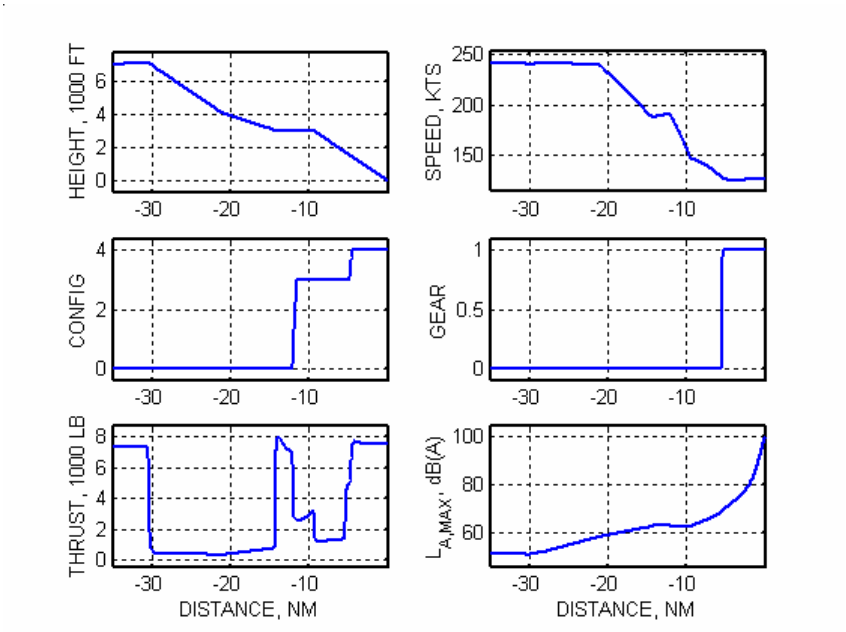


Abbildung 6-6: Low-Drag-Low-Power Anflugverfahren

Das beschriebene Verfahren ist bereits lärmreduzierend und wird als "Low-Drag-Low-Power (LDLP)" oder "Frankfurter" Verfahren bezeichnet und von der DLH schon seit den siebziger Jahren eingesetzt. Fahrwerks- und Klappenfahren erst auf dem Gleitpfad, so spät wie möglich, bedeutet eine widerstandsarme Konfiguration (geringes C_W/C_A), erfordert damit weniger Schub und reduziert somit den Lärmpegel.

Höhen- und Geschwindigkeitsprofil, Stellung von Fahrwerk und Landeklappen, sowie Triebwerksschub und Maximalschallpegel (berechnet mit INM) direkt unterhalb der Flugbahn sind in Abbildung 6-6 für das LDLP-Anflugverfahren über der Entfernung zum Aufsetzpunkt aufgetragen. Besonders deutlich wird die Schuberhöhung im Bereich der Zwischenanflughöhe. Der Maximalschallpegel steigt mit abnehmender Höhe in der Anfangsphase kontinuierlich an, erhöht sich im Bereich der Zwischenanflughöhe durch die Schuberhöhung weiter und nimmt im Endbereich des Landeanflugs drastisch zu.

Das Low-Drag-Low-Power Anflugverfahren kann als Stand der Technik angesehen werden und soll im weiteren als Referenz für eine Lärmoptimierung, d.h. Lärmminimierung, dienen.

6.3.3. Optimierungsansatz

Der Lärmpegel direkt unterhalb der Flugbahn hängt vom Abstand zum Flugzeug und dessen Lärmemission ab. Bei heutigen Flugzeugen ist es möglich, dass der Zellenlärm (Triebwerke im Leerlauf) gegenüber dem Triebwerkslärm einen dominierenden Anteil liefert. Der Optimierungsansatz geht also dahin die Anflugbahn höher zu legen, das Schubniveau möglichst

über den gesamten Anflug zu senken und nach wie vor Konfigurationsänderungen so spät wie nur irgend möglich durchzuführen.

6.3.4. Ergebnis

Ein Anheben der Bahn im *Nahbereich* ist grundsätzlich durch steilere Anflüge möglich, die sich entweder über den gesamten Gleitpfadbereich erstrecken (Steep Approach) [6-6] oder ausschließlich im Anfangsteil vorliegen (Two Segment Approach). Abbildung 6-7 zeigt die Höhenprofile möglicher Anflugvarianten. Steilere Bahnen können zu einem Erreichen der Leistungsgrenzen moderner Flugzeuge führen, da Bahnwinkel von weniger als –5° aufgrund der heutigen aerodynamischen Güte stationär kaum fliegbar sind. Zum anderen ist ein Anheben des Gleitpfades an vielen Flughäfen nicht ohne weiteres möglich. Auch ein segmentierter Anflug, bestehend aus einem steilen Anfangssegment auf einer geführten Bahn und dem üblichen 3° Endteil kann z.Zt. nicht durchgeführt werden. Es bedarf in beiden Fällen zusätzlicher Ausrüstung sowohl an Bord als auch am Boden. Des weiteren werden steile Anflüge von Piloten oftmals als "kontrollierte Abstürze" bezeichnet. Eine Einstellung, die sich nur mittels erweiterter Pilotenunterstützung und –schulung ändern lassen wird.

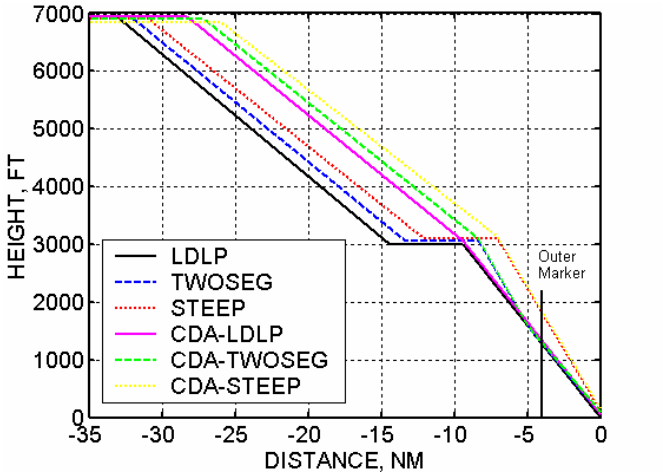


Abbildung 6-7: Höhenprofile verschiedener Anflugverfahren

Im *Fernbereich* kann die Zwischenanflughöhe angehoben und somit der Abstand zur Lärmquelle vergrößert werden. Die Notwendigkeit einer Schuberhöhung wird damit jedoch nicht umgangen. Sinnvoller ist es, auf die Zwischenanflughöhe zu verzichten und einen Sinkflug mit kontinuierlichem Übergang auf den Gleitpfad durchzuführen. Dieses Verfahren wird als "Continuous Descent Approach (CDA)" bezeichnet. Es hat allerdings Einfluss auf die Planung der Ankunftszeit und somit auf die Landekapazität eines Flughafens und wird deshalb bislang nur bei geringer Verkehrsdichte, d.h. hauptsächlich nachts eingesetzt, da relativ hohe zeitliche Schwankungen auftreten.

Das Bild 6-8 zeigt die Konturen des Maximalschallpegels für die verschiedenen vorgestellten Anflugverfahren (siehe auch [6-7]). Besonders deutlich wird die Abnahme der 60 dB Kontur bei den CDA-Verfahren. Bei Two Segment und Steep ergibt sich eine Verringerung für die höheren Pegelwerte.

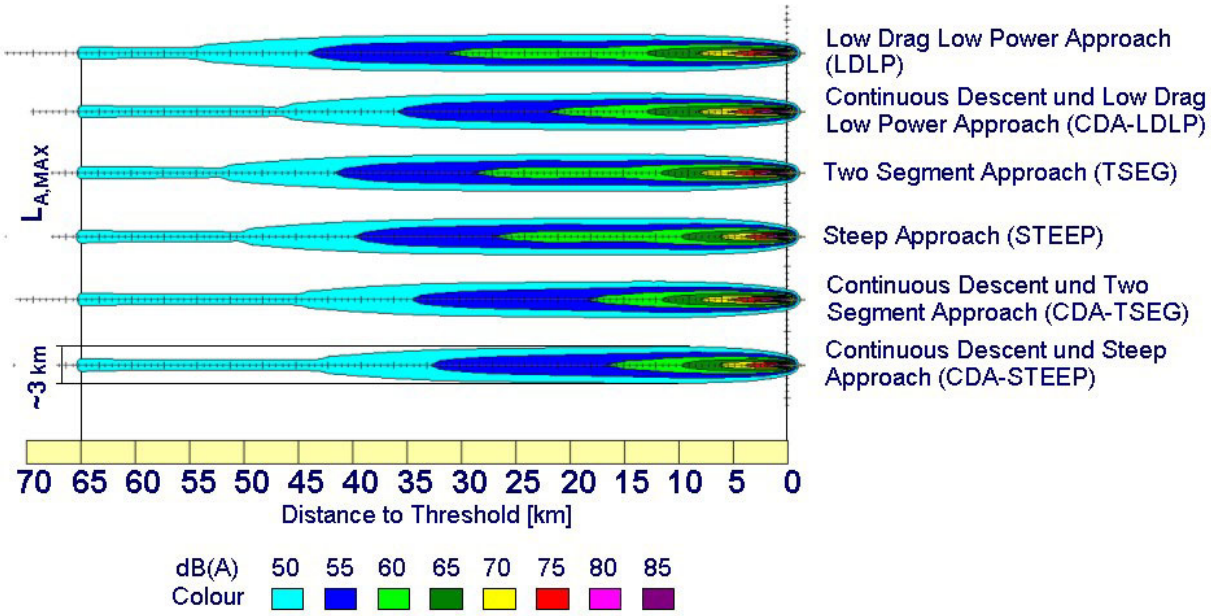

Low Drag Low Power Approach (LDLP)
Continuous Descent und Low Drag Low Power Approach (CDA-LDLP)
Two Segment Approach (TSEG)
Steep Approach (STEEP)
Continuous Descent und Two Segment Approach (CDA-TSEG)
Continuous Descent und Steep Approach (CDA-STEEP)
LA,MAX
~3 km
70 65 60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Distance to Threshold [km]
dB(A) 50 55 60 65 70 75 80 85
Colour

Abbildung 6-8: Konturen konstanten A-bewerteten Maximalschallpegels für verschiedene Anflugverfahren

Die Kombination von CDA und Steep bzw. Two Segment Approach kommt dem Optimierungsansatz am nächsten. Die Bahn liegt gegenüber der Referenzbahn des LDLP signifikant höher, das Schubniveau ist niedriger und die Konfigurationsänderungen erfolgen später. Abbildung 6-9 zeigt charakteristische Werte für einen CDA in Verbindung mit einem –4° Steep Approach.

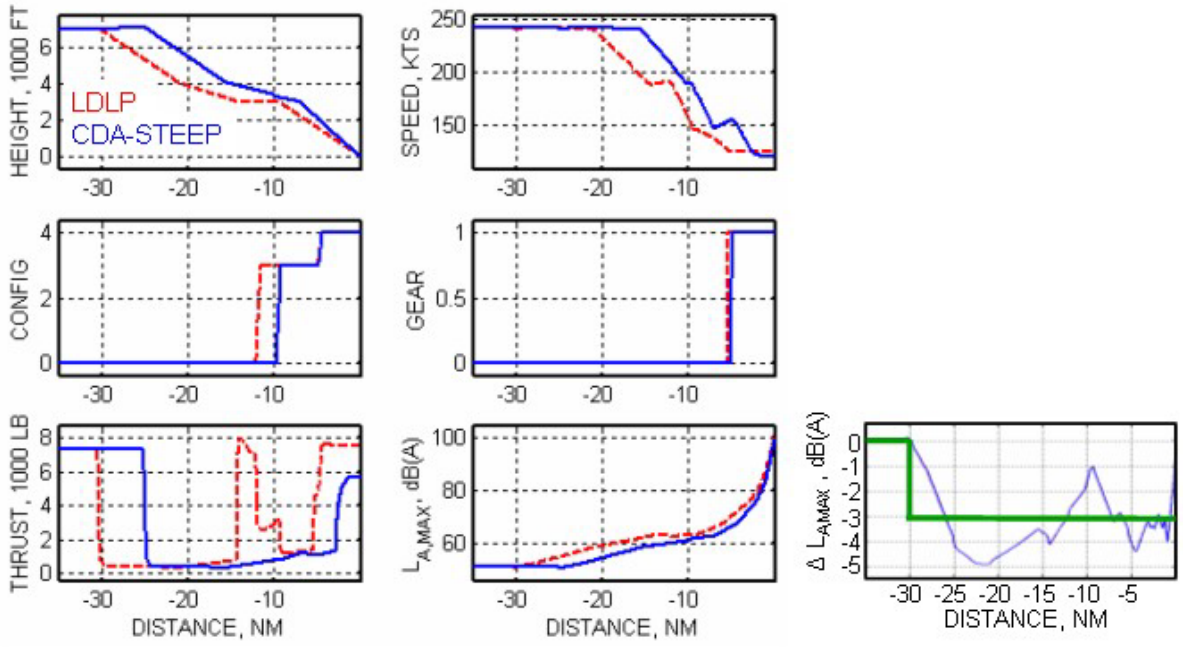


Abbildung 6-9: Continuous Descent Approach / Steep Approach im Vergleich zum Low-Drag-Low-Power Approach

Im Vergleich zum LDLP verringert sich der Maximalschallpegel um bis zu 5 dB(A) bei einer Entfernung von ca. 20 nm und bei einem Grundpegel von 60 dB(A) (siehe Abbildung 6-9). Des weiteren zeigt sich auch im Flughafennahbereich eine Minderung von 3 bis 4 dB(A). Die angestrebte Abminderung von 3 dB(A) kann somit im Mittel erreicht werden.

6.3.5. Umsetzung in operationelle Prozeduren

Ein steiler, bis an den Boden reichender Endanflug ist für eine kurzfristige Umsetzung in eine fliegbare Prozedur nicht geeignet, da der Gleitpfad, wie eingangs erwähnt, an den meisten Flughäfen nicht ohne weiteres angehoben werden kann. Dies gilt auch für Anflüge die geodätisch geführt auf zwei Segmenten durchgeführt werden sollen, denn für das steilere Anfangssegment müsste entweder ein zweiter Gleitpfadsender aufgestellt oder eine andere Art der geodätischen Bahnführung ermöglicht werden, wie z.B. der Einsatz von GPS.

Möglich ist aber auch, das steile Anfangssegment eines Zweisegment-Anflugs über einen bordseitig geregelten Bahnwinkel zu erfliegen (Selected Flight Path Angle). Wenn der Gleitpfad dann in ca. 2000 ft AGL von oben eingenommen wird, sollte eine Stabilisierung innerhalb der nächsten 1000 ft möglich sein, um die Forderungen der SOP’s (stabiler Flugzustand in 1000 ft AGL) einzuhalten. Allerdings ist eine Lärmreduktion in gleichem Ausmaß, wie bei durchgängig steilen Anflugverfahren, in diesem Fall nicht zu erzielen.

Die Verbindung eines derart gestalteten Zweisegment-Anfluges mit einem CDA wird im folgenden als Segmented Continuous Descent Approach, kurz SCDA, bezeichnet. Der SCDA enthält die folgenden 5 Segmente (Abbildung 6-10):

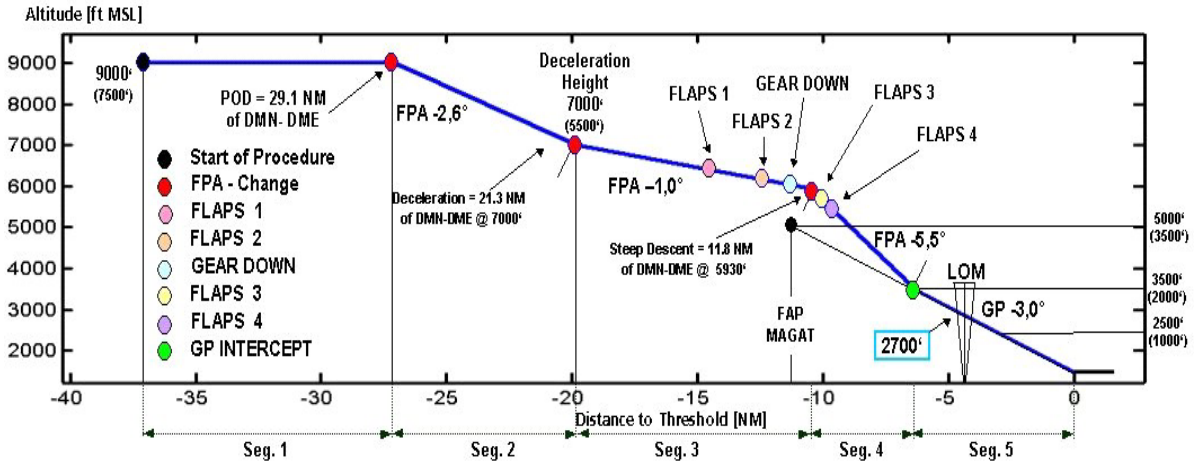


Abbildung 6-10: Segmente eines “Segmented Continuous Descent Approach”

1. Segment: Horizontalflug mit konstanter Fluggeschwindigkeit
2. Segment: Sinkflug mit konstanter Fluggeschwindigkeit
3. Segment: Verzögerung verbunden mit dem Einnehmen der Anflugkonfiguration, Fahrwerksfahren und Einnehmen der Landekonfiguration
4. Segment: Steilanflugsegment mit Einfliegen des Gleitpfades von oben
5. Segment: Nominaler Gleitpfad, Stabilisieren bis 1000 ft Höhe

Die Bahnwinkel des 1. und 5. Segmentes sind durch den Horizontalflug ($\gamma = 0°$) und den Gleitpfad (in der Regel $\gamma = 3°$) vorgegeben. Die Bahnwinkel- und Verzögerungsvorgaben des 2., 3. und 4. Segmentes ergeben sich aus der Forderung nach Leerlaufschub und den Flugleistungen des betrachteten Flugzeugmusters.

Die Bestimmung des Anfangspunktes des 2. Segmentes (Point oder Top of Descent), das strikte Einhalten der Prozedur und ein über der Höhe veränderlicher Wind beinflussen den Punkt des Einfliegens in den Gleitpfad entscheidend. Heutige Flight Management Systeme sind nicht in der Lage den POD mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen oder dem Piloten während der Prozedur Korrekturmaßnahmen vorzuschlagen.

6.4. Demonstration der Fliegbarkeit eines SCDA

Das vom DLR betriebene Versuchsflugzeug ATTAS (Advanced Technologies Testing Aircraft System) eignet sich besoders für eine Demonstration der Fliegbarkeit eines SCDA. Entsprechende Flugversuche wurden in einem Festsitzsimulator vorerprobt und am Forschungsflughafen Braunschweig durchgeführt. Der Anflug von Osten auf Braunschweig weist gewisse Besonderheiten auf. So liegt die Zwischenanflughöhe bei 2000 ft, d.h. 1000 ft tiefer als im Normalfall, und der Gleitpfad ist mit 3.5° im Vergleich zu den üblichen 3° steiler (rote Kurve in Abbildung 6-11). Die grüne Kurve im Bild zeigt das Höhenprofil des verwendeten LDLP Referenzfalles dar.

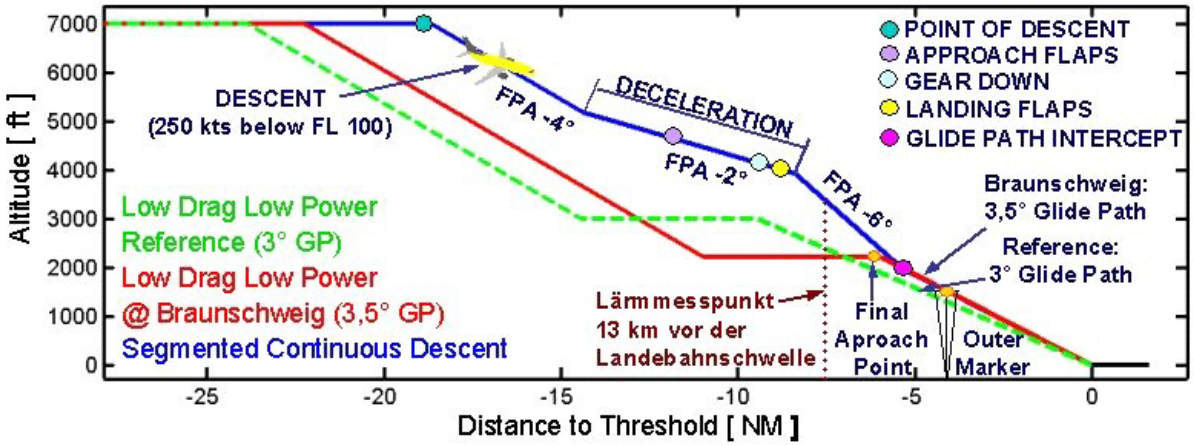


Abbildung 6-11: Gestaltung eines SCDA am Forschungsflughafen Braunschweig

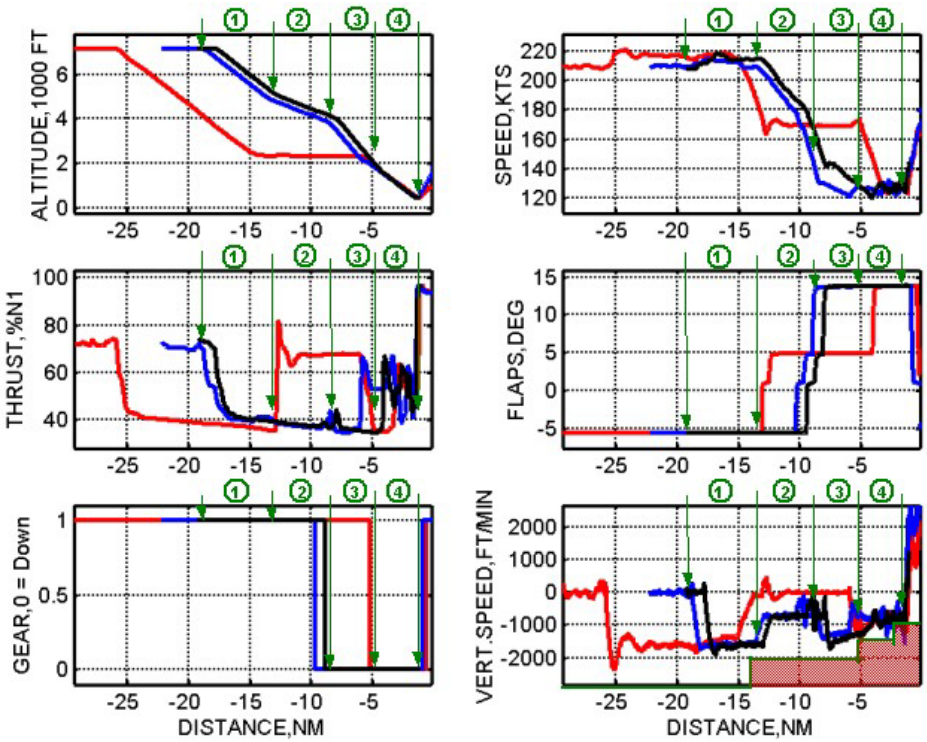


Abbildung 6-12: Verlauf von Flugzustands- und Steuergrößen aus dem Flugversuch

Das Steilflugsegment des SCDA konnte von ATTAS mit einem Bahnwinkel von -6° geflogen werden, was von den heutigen modernen Verkehrsflugzeugen aufgrund ihrer höheren aerodynamischen Güte nicht erreichbar ist.

Fliegbarkeit und Reduktion der Lärmimmission konnten eindrucksvoll demonstriert werden. In Abbildung 6-12 sind Flugzustands- und Steuergrößen über dem Abstand zur Landeschwelle für das Referenzverfahren und für zwei SCDA aufgetragen. Bei zeitgerechter Vorgabe des Flugbahnwinkels und unter Verwendung des “Flight Control Systems“ (FCS) wurde die gewünschte Bahn und Geschwindigkeit eingenommen und der Gleitpfad problemlos von oben eingeflogen. Die laut SOP’s maximal zulässigen Sinkraten wurden nicht überschritten. Eine Lärmpegelmessung ca. 7 nm vor der Schwelle direkt unterhalb der Flugbahn ergab eine deutliche Reduktion gegenüber dem Referenzverfahren.

6.5. Erstellung von Konzepten zur Integration verbesserter Verfahren in moderne Air Traffic Management Systeme

Die durchgeführten Untersuchungen deuten darauf hin, dass durch den operationellen Einsatz lärmmindernder Anflugverfahren Verringerungen der am Boden zu erwartenden Lärmbelastung erreicht werden können. Die von den einzelnen Flugzeugen ausgehende Lärmbelastung wird dabei umso geringer sein, je geringer das Schubniveau der Triebwerke und je größer die Anflughöhe sein wird. Aus diesem Grund sollte im Anflugbereich auf Zwischenanflugsegmente in geringer Flughöhe und mit hohem Schubniveau nach Möglichkeit verzichtet werden.

In der operationellen Praxis werden derzeit Continuous Descent Approach (CDA) Verfahren in der Form eingesetzt, dass die Flugzeugführer von der Flugsicherung Freigaben für Anflüge mit diesem Verfahren erhalten und dann die Anflüge ohne weitere Anweisungen der Fluglotsen nach eigenem Ermessen durchführen. Bedingt durch die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Schätzung der Ankunftszeiten kann dieses Verfahren allerdings nur bei geringer Verkehrsdichte und hinreichend großer Separation der Flugzeuge eingesetzt werden. Bei höherer Verkehrsdichte werden die Flugzeuge durch Höhen-, Kurs- und Geschwindigkeitsanweisungen separiert zur Landung geführt, so dass die Anflugverfahren zum Teil durch die Anweisungen der Fluglotsen bestimmt werden. Die Separation der Flugzeuge erfolgt dabei durch Schätzung der zukünftigen Position aller Flugzeuge und entsprechenden taktische Anweisungen der Fluglotsen.

Zukünftige Air Traffic Management (ATM) Konzepte sehen vor, dass die Separation der Flugzeuge durch konfliktfrei geplante Trajektorien und die Überwachung der Einhaltung dieser Trajektorien erfolgt. Dabei sollen auch bord- bodenseitige Abstimmungen der Trajektorien über Datenverbindungen (Data-Link) möglich sein. Grundsätzlich können in derartige "trajektorienbasierte" ATM Systeme beliebige Arten von Anflugverfahren implementiert werden. Voraussetzung für den operationellen Einsatz sind allerdings entsprechende bord- und bodenseitige Unterstützungssysteme zur Planung und Führung des Anflugverkehrs.

Die bodenseitigen Planungsfunktionen im Anflugbereich umfassen im Wesentlichen die

- Bestimmung der zu erwartenden Ankunftszeiten auf der Basis von vorausberechneten Trajektorien für Standardanflugrouten und lärmarme Anflugverfahren, die
- Reihenfolgeplanung zur bestmöglichen Ausnutzung der Landebahnkapazität unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Wirbelschleppenstaffelung und die
- Konfliktfreie Planung der Anflugtrajektorien zur Einhaltung der Zielankunftszeiten auf der Basis lärmreduzierender Anflugrouten und lärmarmer Anflugverfahren.

Zur Einhaltung der geplanten Trajektorien während der Flugdurchführung sind zudem bordseitige Unterstützungsfunktionen erforderlich:

- Pilotenunterstützung zur 3D-/4D-Navigation entlang der geplanten Trajektorien
  - Flight Director Funktionen
  - Autopilot Funktionen
  - Flight Management System (FMS) Funktionen.

Mit zusätzlichen bodenseitigen Funktionen wird die Einhaltung der geplanten Trajektorien überwacht, um Abweichungen durch entsprechende Anweisungen zu korrigieren oder um Neuplanungen zu initiieren:

- Lotsenunterstützung zur 3D-/4D- Führung des Anflugverkehrs entlang der konfliktfrei geplanten Trajektorien
  - Überwachung der Einhaltung der geplanten Trajektorien
  - Führungsanweisungen bei Abweichungen von den geplanten Trajektorien
  - Durchführung von Neuplanungen.

Durch die Einbeziehung der unter bodenseitigen Vorgaben bordseitig berechneten (FMS) Trajektorien werden zum einen die Planungsgenauigkeiten erhöht und zum anderen die bei der Flugdurchführung zu erwartenden Abweichungen verringert.

Mit der Umsetzung dieser Konzepte kann erreicht werden, dass lärmreduzierende Streckenführungen und Anflugverfahren an Verkehrsflughäfen auch zu Tageszeiten mit hoher Verkehrsdichte ohne unerwünschte Reduktionen der Landebahnkapazitäten eingesetzt werden können.

6.6. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass kurzfristige Reduktionen der Lärmimmission um Flughäfen nur durch die Einführung lärmarmer An- und Abflugverfahren erreicht werden können. Die daraus resultierende Forderung zur Verbesserung bestehender und Einführung neuartiger, auf den heutigen Stand der Technik optimierter Verfahren, bedingt die Entwicklung von geeigneten, validierten Simulationsumgebungen. Durch derartige Modelle, welche eine detaillierte Beschreibung von Schallquellen und –ausbreitung ermöglichen, können belastbare Ergebnisse für zukünftige An- und Abflugverfahren produziert und anschließend in Flugversuchskampagnen verifiziert werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde, neben dem Primärziel der Reduktion der Lärmimmission am Boden, ein großes Augenmerk auf die Randbedingungen Sicherheit, Flugsicherung, ökonomische Durchführbarkeit und gesetzliche Grundlagen gelegt, um wirklich kurzfristige Resultate zu produzieren, welche für allen Beteiligten akzeptabel und mit relativ geringem Aufwand umsetzbar sein sollten:

Das Ziel der unmittelbaren Umsetzbarkeit erfordert die Schaffung von Flugverfahren, welche mit dem heutigen Ausrüstungsstand auskommen. Alle vorgestellten Verfahren versuchen, dieser Randbedingung gerecht zu werden.

Für zweistrahlige Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge, mit der A320 als typischem Vertreter dieser Klasse, konnte die Einführung einer Zwischenbeschleunigungshöhe („Intermediate Acceleration Height“) beim Abflug als positiv für die Reduktion des Lärmimmissionsniveaus identifiziert werden. Dabei werden im Gegensatz zu herkömmlichen lärmarmen Abflugverfahren nennenswerte Zeit- und Treibstoffeinsparungen bei ähnlichem Lärmreduktionspotenzial erzielt. Durch Verschiebung dieser Beschleunigungshöhe kann das Verfahren, mit Einschränkungen, an lokale Bevölkerungsverteilungen bzw. an Tag-/Nachtflugbetrieb angepasst

werden. Zusätzliche Maßnahmen wie z.B. das Erhöhungen der Flughöhen zur Schubreduktion von Start- auf Reisesteigflugschub bringen weitere Lärmreduktionen mit sich, bei vergleichbarem zusätzlichem Treibstoff- und zeitlichen Bedarf.

Bei den Anflugverfahren gilt, dass ein CDA in Verbindung mit einem Steilanflug ein gewisses Maximum an Lärmreduktion über den gesamten Anflugbereich liefert. Die Möglichkeit einer kurzfristigen Umsetzung in den Flugbetrieb muss jedoch in Frage gestellt werden. Als gangbarer Weg stellt sich ein CDA dar, der den Gleitpfad von oben in einer Höhe erreicht, von der aus eine Stabilisierung des Flugzustandes bis in 1000 ft AGL noch möglich ist. Dieses Verfahren führt zwar nicht zur gewünschten maximalen Lärmreduktion, ist jedoch nach notwendigen Erweiterungen bzw. Verbesserungen der Funktionalität des FMS (Berücksichtigung von Konfigurations- und Windänderungen) auch relativ kurzfristig einsetzbar.

Abschließend kann gesagt werden, dass die theoretisch gewonnen Ergebnisse den Nachweis zur kurzfristigen Lärmreduktionen mittels optimierter An- und Abflugverfahren liefern. Diese positiven Erkenntnisse sollten als Anstoß für weiterführende, detaillierte Flugversuchskampagnen genutzt werden, um, nach iterativer Optimierung mit den Erkenntnissen aus den praktischen Versuchen, eine rasche Einführung der Verfahren zu ermöglichen. Ebenfalls empfiehlt es sich, das gewonnene Know-how aus dem Optimierungsprozess direkt in die Auslegung von bord- und bodenseitig benötigter Ausrüstung zu investieren, um mit zukünftigen Flugzeugtypen ein noch deutlicher reduziertes Lärmimmissionsniveau und das Fernziel des „Leisen Luftverkehrs“ zu erreichen.

6.7. Schrifttum

[6-1] Boeing Commercial Airplanes: *Statistical Summery of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959-2002. Airplane Safety*. Seattle, Mai 2002

[6-2] Deutsche Lufthansa AG: *Lufthansa Geschäftsbericht 2001.* Köln, Juni 2002

[6-3] ICAO: *Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations.* Volume 1 Flight Procedures 4th Edition, Amnd. 11, Part V, Noise Abatement Procedures, Chapter 3.

[6-4] Brockhaus, R.: *Flugregelung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1994

[6-5] Perez Diestro, J.: *Sourdine II D3-1.1, Definition of new noise abatement procedures.* Ingenieria y Economia del Transporte, 2003

[6-6] Hamel, P.: *Noise-abatement flight profiles for CTOL and V/STOL aircraft.* Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht 71-10 (1971)

[6-7] Saliaris, C.: *Untersuchungen von lärmarmen An- und Abflugverfahren für verschiedene Verkehrsflugzeuge.* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig, Institutsbericht, IB 111-2004/04

7. Verkehrspolitische Lärmminderungskonzepte

Hauptarbeitspaket 4: ***Volker Warlitzer, E-Mail:*** volker.warlitzer@dlr.de
DLR Institut für Verkehrsforschung
Verkehrsforschung, Köln

7.1. Forschungsziel

Im Hauptarbeitspaket 4 sollten die folgenden Ziele erreicht werden:

- Erstellung einer Dokumentation und Synopse an deutschen und internationalen Verkehrsflughäfen bereits angewandter verkehrspolitischer Lärmminderungsverfahren.
- Analyse und Bewertung aller – auch theoretisch entwickelter und noch nicht angewandter – Maßnahmengruppen hinsichtlich ihrer Verkehrswirkungen, ihres Lärmminderungspotentials und ihrer wirtschaftlichen Folgewirkungen. Bewertungskriterium ist ein hohes Lärmminderungspotential mit möglichst geringen Restriktionen für die Verkehrs- und Wirtschaftsentwicklung.
- Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zur Auswahl verkehrspolitischer Lärmminderungskonzepte für eine flughafenspezifische Anwendung durch Flughäfen und Gesetzgeber.
- Modellrechnungen zu Lärmminderungsstrategien für einen fiktiven Referenzflughafen. Quantifizierung der Lärmreduzierungen mit rechnerischen Lärmprognoseverfahren (AP 5A).

7.2. Dokumentation und Synopse in Deutschland und im internationalen Umfeld angewandter Maßnahmen

7.2.1. Maßnahmenarten und ihre internationale Verbreitung

Die Dokumentation und Synopse der internationalen Verbreitung flughafenspezifischer Lärmminderungsmaßnahmen basiert auf einer von der Boeing Company dokumentierten weltweiten Auswahl von derzeit 590 Verkehrsflughäfen (siehe Tabelle 7-1).

	Afrika	**Amerika**	**Asien**	**Australien**	**Ozeanien**	**Europa**	**Welt**
Anzahl	15	344	41	9	11	170	590
Anteil	2.5 %	58.3 %	6.9 %	1.5 %	1.9 %	28.9 %	100 %
	Kanada	USA	Mittelam.	Südam.	EU ohne D	D	übr. Eur.
Anzahl	16	298	19	11	113	27	30
Anteil	2.7 %	50.5 %	3.2 %	1.9 %	19.2%	4.6 %	5.1 %

Tabelle 7-1: Regionale Verteilung weltweiter Verkehrsflughäfen (Auswahl Boeing Datenbasis)

Nach geographischer Zuordnung sind über 50% US-Flughäfen, knapp 24% liegen in der EU; weitere 5% befinden sich im übrigen Europa und der Rest von 11% verteilt sich auf alle anderen Teile der Welt. Neben allen Großflughäfen, die z.B. in Deutschland unter der Bezeichnung „Internationale Verkehrsflughäfen“ ausgewiesen sind, enthält die Dokumentation auch kleinere, jedoch nicht alle, Verkehrsflughäfen der Welt.

Soweit diese Flughäfen verkehrspolitische Maßnahmen anwenden, lassen sich diese inhaltlich zehn Gruppen zuordnen. Ein Überblick über den Anwendungsstatus der Maßnahmen wird erst durch die Einbeziehung der Ausgestaltungsbandbreite aussagekräftig. Im Folgenden werden die Maßnahmengruppen daher zunächst mit entsprechenden Hinweisen dargestellt (sieh auch Tabelle 7-2).

Art der Maßnahmen	Anwendungshäufigkeit in % jeweils nach Region											
	Welt insg.	Afrika	Asien	Kanada	USA	Mittelam.	Südam.	Australien	Ozeanien	EU	Übr. Eur.	D
Betriebszeitenbeschränkungen (Sperrstunden)	39	33	34	38	24	32	27	56	55	68	50	85
Bewegungskontingentierungen	15	0	5	6	4	0	0	11	9	16	0	7
Lärmkontingentierungen	2	0	0	6	2	0	0	0	9	3	0	0
Lärmabhängige Start- und Landegebühren	19	7	27	0	1	16	9	33	27	59	37	93
Fluglärmüberwachung **(*)**	30	7	27	31	25	5	0	78	18	46	27	74
Lärmpegelbegrenzungen (Grenzwerte) **(*)**	15	0	24	13	11	0	9	0	9	26	27	15
Lärmschutzprogramme **(*)**	30	0	12	0	53	0	0	0	9	7	0	4
Verkehrsbeschränkungen für Chap. 2 Flugzeuge **(1)**	23	7	7	19	11	0	9	33	9	46	17	63
Ausschluss von Chap. 2 Flugzeugen	9	0	5	6	5	0	9	0	9	13	17	7
Verkehrsbeschränkungen für Chap. 3 Flugzeuge	8	0	0	13	2	0	0	0	0	20	7	44
Durchschnittliche Anwendung insgesamt in %	23	10	19	20	18	11	11	28	20	34	22	42
Durchschnittliche Anwendung in %	**19**	**5**	**14**	**13**	**14**	**5**	**6**	**21**	**15**	**30**	**18**	**39**
Durchschnittliche Anwendung in % ohne (*)	**16**	**7**	**11**	**13**	**7**	**7**	**8**	**19**	**17**	**32**	**18**	**43**
Absolutzahl Flughäfen	**590**	**15**	**41**	**16**	**298**	**19**	**11**	**9**	**11**	**140**	**30**	**27**

(1) Für Chap. 2 Flugzeuge bestehen in der EU generelle Verkehrsbeschränkungen, die von EU-Flughäfen teilweise nicht ausdrücklich angegeben wurden. Für EU / D gilt somit von eine durchgängige Anwendung dieser Maßnahme

Quelle: Eigene Auswertung "Airport Noise Regulations" Datenbasis Boeing Company 10.03

Tabelle 7-2: Internationale Anwendung verkehrspolitischer Lärmminderungsmaßnahmen (Basis 590 Verkehrsflughäfen weltweit)

Die weltweit am häufigsten angewandten verkehrspolitischen Lärmminderungsmaßnahmen sind mit 228 Anwendungen (39%) **Betriebszeitenbeschränkungen oder Sperrstundenregelungen** für Flughäfen während der Nachtstunden. Sperrstunden weisen 85% der deutschen und 68% der EU-Flughäfen aus. Hoch sind auch die Anwendungsraten in Australien mit 56% und im ozeanischen Raum mit 55%. Eine geringe Regelungshäufigkeit weisen die USA mit 24% und Südamerika mit 27% aus. Die Sperrstundenzeiträume liegen überwiegend zwischen 22:00 und 6:00 Uhr, mehr oder weniger starke Abweichungen von diesem Zeitraum sind jedoch üblich. Nur in wenigen Fällen bedeuten die Sperrzeiten eine absolute Betriebseinstellung oder sogar Schließung des Flughafens in dieser Zeit. Oft sind verspätete Flüge, Postflüge, hoheitliche Flüge und Notfall- oder Rettungsflüge in der Sperrzeit zugelassen. Schon Start- und Landeverbote für z.B. Kapitel 2- Flugzeuge während der Nachtstunden werden von Flughäfen als Betriebszeitenbeschränkungen deklariert. Sperrstundenregelungen oder Betriebszeitenbeschränkungen sind grundsätzlich den „harten“ indirekten oder

flugbewegungsbezogenen Lärmminderungsmaßnahmen zuzuordnen, wenn dadurch Flugbewegungen ganz entfallen oder mit leiserem Fluggerät durchgeführt und somit wirksam werden, wobei das Ausmaß der Wirkung sehr von der Rigidität der Beschränkungen abhängt. Darüber hinaus ist die Wirksamkeit noch davon abhängig, inwieweit und auf welche an die Sperrstundenzeiten angrenzende Zeiträume ggf. Flugbewegungen verlagert werden.

Eine ebenfalls sehr häufig ausgewiesene Maßnahme ist mit 175 Nennungen (30%) die **Fluglärmüberwachung**. Sie wird besonders häufig in Australien von 78%, in Deutschland 74% und in der EU von 46% der Flughäfen angewandt. Fluglärmüberwachung bedeutet hier zunächst nichts anderes als eine Dokumentation des Fluglärms mit Messgeräten. Die Fluglärmüberwachung kann dabei auf gelegentliche oder regelmäßige Messkampagnen beschränkt sein oder aber als ständige und lückenlose Fluglärmerfassung mit entsprechender Berichterstattung durchgeführt werden. Die Fluglärmüberwachung ist zunächst nur ein Kontrollinstrument und keine Lärmminderungsmaßnahme. Dies wird sie erst in Verbindung mit Planungs- und Sanktionsmaßnahmen, die die Dokumentationsergebnisse als notwendige Bestimmungsgröße benutzen. Solche Maßnahmen werden jedoch von vielen Flughäfen mit Fluglärmüberwachung nicht angewandt. Gleichfalls 175 Nennungen weisen die so genannten **Lärmschutzprogramme** auf, Maßnahmen, die hauptsächlich in den USA von 53% der Flughäfen angegeben werden. Die Inhalte dieser Programme sind in den überwiegenden Fällen wenig konkret und effektiv. Dies gilt abgeschwächt auch für **Vorgabe von Grenzwerten für Lärmpegel**, die von 89 oder 15% der Flughäfen angegeben werden, die aber in der Regel für einen realen Lärmschutz nicht relevant sind.

Häufige und gleichsam sehr wirksame verkehrspolitische Lärmminderungsmaßnahmen sind **Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 2-Flugzeuge** nach ICAO Annex 16, die gemäß den Angaben weltweit für 133 Flughäfen (23%) gelten. Dabei geben die dokumentierten Angaben nicht den Gesamtumfang ihres Einsatzes wieder. Tatsächlich ist der Einsatz von Kapitel 2-Flugzeugen seit April 2002 in der EU verboten und wird entsprechend zu 100% durchgeführt. Dies wird aber teilweise von Flughäfen in der EU nicht mehr angegeben. Gleiches gilt entsprechend in der EU für den **Ausschluss von Kapitel 2-Flugzeugen**. Auch ein Drittel der australischen Flughäfen hat Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 2-Flugzeuge eingeführt.

Typisch ökonomische verkehrspolitische Lärmminderungsmaßnahmen sind **Lärmabhängige Start- und Landegebühren** die weltweit an112 Flughäfen (19%) in sehr unterschiedlicher Ausgestaltung eingesetzt werden; in Deutschland an 93% aller Flughäfen, davon an allen Internationalen Deutschen Verkehrsflughäfen. Für die Flughäfen in der gesamten EU beträgt der Anteil 59%, gefolgt von denen im übrigen Europa mit 37% und in Australien mit 33%. In den USA und Kanada wird diese Maßnahme fast nicht angewandt.

46 Flughäfen (8%) haben **Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 3-Flugzeuge** (im Nachtflugbetrieb) eingeführt, dies gilt insbesondere für 44% der Flughäfen in Deutschland und 20% in der EU. Zu nennen ist hier auch Kanada mit 13% der Flughäfen.

Weiteren international eingesetzten Maßnahmen kommt keine besondere quantitative Bedeutung zu. Es sind dies **Bewegungskontingentierungen**, bei denen die Zahl der Flugbewegungen für einen Flughafen bezogen auf bestimmte (sehr unterschiedliche) Zeiträume limitiert wird. Sie werden weltweit an 86 Flughäfen angewandt. Sie gelten für 16% der Flughäfen in der EU, 11% in Australien, 9% in Ozeanien und 7% respektive zwei Flughäfen in Deutschland, wobei es sich in einem Fall lediglich um eine Begrenzung der Zahl der Fugbewegungen in bestimmten Nachtstunden handelt. **Lärmkontingentierungen**, bei denen eine Lärmmenge (z.B. als Summe der Produkte aus Flugbewegungen und der nach Lärmkategorie oder gemessenem Lärm bewerteten Flugzeuge) bezogen auf einen Zeitraum (z.B. Flugplanperiode oder Jahr) festgelegt wird, die insgesamt von Flugzeugen, die einen Flughafen anfliegen, nicht überschritten werden darf, gelten nur für 14 Flughäfen (2%), davon an fünf Flughäfen in den USA und vier in der EU.

Der Einsatz verkehrspolitischer Lärmminderungsmaßnahmen hat sich über einen sehr langen Zeitraum entwickelt. 1970 hatten nur ca. 30 Flughäfen Betriebszeitenbeschränkungen

und ca. 15 Flughäfen eine Lärmpegelbegrenzung. Lärmabhängige Landegebühren werden erst ab 1970 und andere Maßnahmen international erst ab 1980 eingeführt. Die Verbreitung nimmt dann insgesamt nur sehr geringfügig zu. Eine deutlich höhere Steigerungsrate setzt relativ parallel für alle Maßnahmen etwa 1996/97 ein. Diese flacht ab 1998 jedoch wieder ab auf den Stand von vor 1996. Lediglich die Beschränkungen für Kapitel 2-Flugzeuge (aufgrund Verordnungsregelung) und Beschränkungen für Kapitel 3-Flugzeuge weisen ab 2001/02 nochmals etwas höhere Steigerungsraten auf.

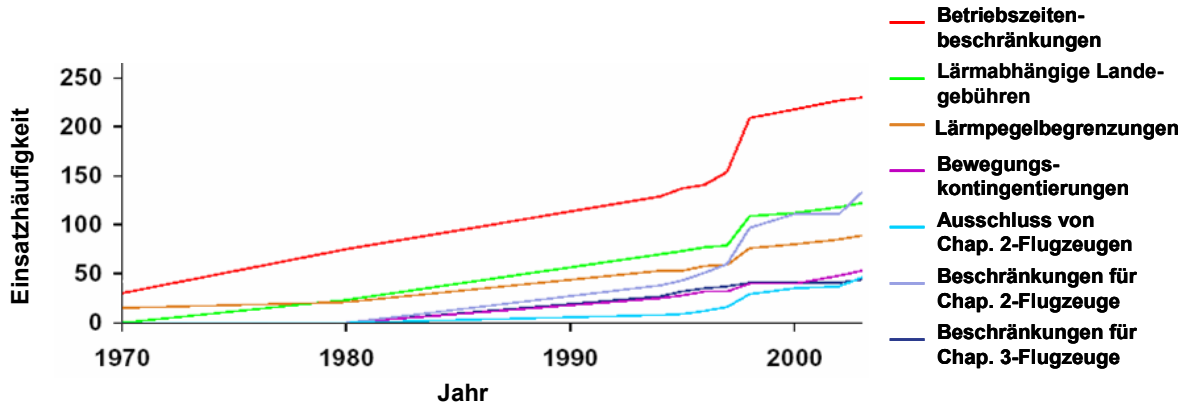


Abbildung 7-1: Entwicklung der internationalen Anwendung verkehrspolitischer Maßnahmen

7.2.2. Verbreitung untersuchter – meist international nicht dokumentierter – Maßnahmen

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden neben den international angewandten und dokumentierten Maßnahmegruppen weitere verkehrspolitische Lärmminderungsmaßnahmen untersucht, die teilweise noch nicht oder nur in Deutschland und angrenzenden Staaten angewandt werden. Daraus resultiert eine Gesamtzahl von 17 Maßnahmengruppen, die soweit nicht oben bereits geschehen, hier mit ihren Inhalten und Ausgestaltungen in Kurzform und nach inhaltlich abgegrenzten Gruppen dargestellt werden.

Direkt lärmbezogene Maßnahmen

- **Lärmabhängige Start- und Landegebühren:** Grundsätzliche Differenzierung des MTOW-abhängigen Anteils der Start- und Landeentgelte mit teilweise ergänzender Beaufschlagung nach Lärmkategorie (ICAO oder auch nach gemessenem Lärm), durch zeitlich gestaffelte Nachtzuschläge; auch z.B. durch weitere Lärmzuschläge zur zweckgebundenen Finanzierung von Schallschutzmaßnahmen (s. Maßnahmengruppe Incentives für Lärmbetroffene/ Lärmschutzprogramme) sowie mit nach Lärmkategorie und Tages- oder Nachtzeit gestaffelten Lärmzuschlägen und Zuschlägen für Passagiere, Fracht und Post.
- **Lärmkontingent:** (Beschreibung s.o.) Wird in Deutschland an bisher zwei Flughäfen nur partiell angewandt.
- **Flugzeugbezogene Lärmpegelbegrenzung:** Im Grundsatz eine Verschärfung der ICAO-Lärmzertifizierungen, die erst durch die damit verbundene Änderungen der Zulassungsbedingungen wirksam werden. Eine Variante wäre eine Begrenzung auf x dB(A) je Flugzeug. Die Angaben zur Anwendung der oben angeführten Maßnahme „Vorgabe von Grenzwerten für Lärmpegel“ bedeuten meist nichts anderes, als dass diese Flughäfen nur von aufgrund von ICAO-Zertifizierung zugelassenen Flugzeugen

angeflogen werden dürfen. Als aktive Lärmminderungsmaßnahme kann sie erst nach Inkrafttreten verschärfter ICAO-Zertifizierungen angewendet werden.

Indirekte oder flugbewegungsbezogene Maßnahmen

- **Betriebszeitenbeschränkung:** (Beschreibung s.o.)
- **Bewegungskontingent:** (Beschreibung s.o.)
- **Frequenzbegrenzung:** Begrenzung der Zahl der Flüge pro Zeiteinheit z.B. auf einer bestimmten Relation administrativ oder auch im Wege der Mediation (s.u.) durch Absprache oder Verpflichtung. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von drei Flughäfen bereits angewandt.
- **Flugzeuggrößenbeeinflussung:** Sowohl genereller Ausschluss bestimmter Flugzeugtypen oder –klassen, als auch administrativer Eingriff hinsichtlich der auf bestimmten Relationen einzusetzenden Flugzeuge (nach Mindest-Sitzplatzkapazität) mit dem Ziel einer Bewegungsreduzierung. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von vier Flughäfen bereits angewandt.
- **Flughafenkooperation zwecks Fluglärmminderung:** Vereinbarung zur Bedienungsaufteilung von Relationen unter in der Regel nahe zusammen liegenden Flughäfen mit dem Ziel, ohne wesentliche Angebotsverschlechterung die Zahl der Flugbewegungen zumindest an einem der kooperierenden Flughäfen zu reduzieren. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland bisher nur von einem Flughafen geplant.
- **Administrative Verkehrsverlagerung:** Vereinbarung zur Bedienungsaufteilung unter benachbarten Flughäfen als staatlich-administrative Maßnahme und nicht im Kooperationswege getroffene Regelung sowie auch eine administrative Verkehrsverlagerung auf einen anderen Verkehrsträger (z.B. die Bahn) durch Verbot von Kurzstreckenflügen. Die Maßnahme ist weder international noch in Deutschland dokumentiert.
- **Modal Split Beeinflussung:** Maßnahmen wie teilweise bei administrativen Verkehrsverlagerungen auf andere Verkehrsträger, die jedoch durch Wettbewerb ausgelöst werden. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von zwei Flughäfen angewandt und einem geplant.

Sowohl lärm- als auch flugbewegungsbezogene Maßnahmen

- **Betriebsbeschränkung:** (Inhalt s.o. unter Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 2- und 3-Flugzeuge und Ausschluss von Kapitel 2-Flugzeugen) In der Regel Ausschluss von nicht zertifizierten und Kapitel 2-Flugzeugen, bis hin zu Kapitel 3-Flugzeugen in den Nachtstunden, auch mit differenzierter zeitlicher Staffelung oder Bewegungskontingentierung.
- **Bewegungs-/Lärmkontingentierung:** Kombination aus Bewegungskontingent und Lärmkontingent mit ggf. unterschiedlich definierten Zeiträumen (z.B. Bewegungskontingentierungen pro Nacht bis hin zu Sperrstunden und Kontingentierungen des Gesamtlärms für eine Flugplanperiode). Die Maßnahme ist weder international noch in Deutschland dokumentiert.

Vorgelagerte Verfahren und Maßnahmen zur Abstimmung, Einführung und Durchsetzung von Lärmminderungsmaßnahmen

- **Mediation:** Verfahren u.a. zur Durchsetzung von Lärmminderungsmaßnahmen unterschiedlicher Art mittels moderierter und von Experten unterstützter Verhandlungen mit im Konsens zu beschließenden Ergebnissen. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von drei Flughäfen angewandt und einem geplant. Das Verfahren wurde dabei nur in einem Fall gemäß seiner komplizierten formalen Definition durchgeführt. Die sonstige Anwendung entspricht eher einem „Runden Tisch“ mit wenigen Teilnehmern.

- **Incentives für Leistungsanbieter:** Z.B. Fluggesellschaften oder Reiseveranstaltern einseitig gewährte Vergünstigungen oder Anreize zur im Gegenzug freiwilligen Einführung von Lärmminderungsmaßnahmen. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von einem Flughafen angewandt und einem geplant. Die Anwendung solcher Maßnahmen ist wettbewerbsrechtlich wegen möglicher Verletzungen des Gleichbehandlungsgrundsatzes sehr problematisch.
- **Individuelle Verfolgung von Lärmverstößen:** (Beschreibung im Grundsatz s.o. unter Fluglärmüberwachung, die jedoch nicht - wie bei dieser Maßnahme - unbedingt zu individuellen Sanktionen führt) Ermahnung, Abmahnung und Verhängung von Bußgeldern an Piloten oder Fluggesellschaften wegen lärmverstärkender fliegerischer Regelverstöße bei Start- und Landung – z.B. durch Abweichen von der Minimum Noise Route oder den Einsatz nicht angemeldeten Fluggeräts.

Maßnahmen zur Erhöhung der Lärmakzeptanz und zur Verminderung der Lärmexposition lärmbetroffener Bevölkerung

- **Incentives für Lärmbetroffene:** Passive Schallschutzmaßnahmen im Flughafenumfeld und Umsiedlungshilfen. Aktivitäten und Maßnahmen der Flughäfen, z.B. ständige aktive und prospektive Information der Bevölkerung über Planungen, Entwicklungen und Betriebsabläufe zur Akzeptanzverbesserung. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; ist aber teilweise unter Lärmschutzmaßnahmen subsumiert; wird in Deutschland von 11 Flughäfen angewandt und einem geplant.
- **Immobilien- und Flächennutzungspolitik:** Grundstückskäufe zur Erhaltung oder Schaffung von Bebauungs-/Siedlungsfreiräumen im Flughafenumfeld oder z.B. Organisation und Finanzierung von Immobilientausch (z.B. Umsiedlung lärmsensibler Anlieger in weniger belastete Räume ggf. im Austausch mit weniger lärmsensiblen gewerblichen Nutzern). Aktive Wahrnehmung der Einflussmöglichkeiten der Flughäfen als Träger öffentlicher Belange auf die Flächennutzungs- und Bebauungsplanung der Gebietskörperschaften. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; ist aber auch teilweise unter Lärmschutzmaßnahmen subsumiert; wird in Deutschland von sieben Flughäfen angewandt, jedoch mit sehr begrenzten Maßnahmen, da die Zuständigkeiten und der rechtliche Rahmen die Handlungsmöglichkeiten bisher sehr einschränken.

7.3. Bewertende Analyse der Maßnahmen

Ein Forschungsziel war, zunächst die flughafenspezifischen Verkehrswirkungen aller Maßnahmen festzustellen und daraus als Hauptergebnis ihre Lärmminderungspotentiale abzuleiten. Weil die Maßnahmen im Ansatz zunächst den Luftverkehr belasten, und im Falle ihrer Wirksamkeit daraus sowohl quantitative als auch qualitative Änderungen des Verkehrs resultieren, sind von diesen Wirkungen grundsätzlich zunächst Fluggesellschaften, Flughäfen und die Luftfahrtindustrie betroffen. Die Bewertungen der mit den Maßnahmen erzielbaren Lärmminderungen waren daher mit ihren direkten wirtschaftlichen Wirkungen abzuwägen. In einer zweiten Bewertungsstufe sollten zusätzlich die indirekten oder Folgewirkungen zu erwartender Verkehrsrestriktionen und Kosten- oder Preissteigerungen des Luftverkehrs auf die jeweils betroffene regionale Wirtschaft und den Wirtschaftsstandort Deutschland mit besonderem Blick auf den Arbeitsmarkt geschätzt werden. Die Bewertung stützte sich einerseits auf die fachtheoretische Literatur und sonstige Fachpublikationen. In erster Linie folgten die Bewertungen jedoch den Ergebnissen einer von uns bei den 18 internationalen deutschen Flughäfen und zwei Flughäfen aus Nachbarländern durchgeführten Erhebung.

Als Schwachstelle erwies sich im Untersuchungsverlauf bei den Flughafenerhebungen, dass die Wirkungen der von Flughäfen angewendeten Maßnahmen auf den Verkehr faktisch weder quantitativ noch qualitativ bestimmt oder dokumentiert werden konnten. Gleiches galt für

die Literaturauswertung. Die Gründe dafür liegen einmal darin, dass die Flughäfen trotz wachsenden Verkehrsaufkommens in der Vergangenheit über lange Zeiträume erhebliche Lärmminderungen hauptsächlich und regelmäßig durch technische Verbesserungen an Flugzeugen verzeichnen konnten, so dass keine besondere Dringlichkeit zum forcierten Einsatz anderer Lärmminderungsmaßnahmen oder einer Überprüfung deren Wirksamkeit bestand. Dies bedeutete nicht, wie die Dokumentation des Einsatzes verkehrspolitischer Lärmminderungsmaßnahmen zeigt, dass z.B. keine verkehrspolitischen Lärmminderungsmaßnahmen eingesetzt wurden. Aber es unterblieben methodische Überprüfungen der selbst angewandten Maßnahmen, und es wurden auch keine Verfahren zur Dokumentation von Maßnahmewirkungen von Anbeginn ihrer Einführung entwickelt. Ein eindeutiges Ergebnis der Untersuchung ist auch, dass bei den Gegebenheiten des in der Vergangenheit stark wachsenden Luftverkehrsmarktes die Ausgestaltungen der Einzelmaßnahmen (wie Landegebührenspreizung) fast immer unterhalb ihrer Wirksamkeitsschwelle blieben. Als Grundlage zur Bewertung der Maßnahmen mussten daher Schätzungen verwendet werden, die sich in erster Linie auf Angaben der bei den Flughäfen durchgeführten Erhebungen und die Literatur- und Einzelstudienanalyse stützen. Fluggesellschaften stellten hierzu leider nur in geringem Umfang verwertbare Stellungnahmen oder Daten zu ihren möglichen Reaktionen auf bestimmte Maßnahmen oder deren weitere Ausgestaltung zur Verfügung. Dies war einerseits zunächst nicht absehbar, jedoch aufgrund der im Untersuchungszeitraum aufgetretenen externen Ereignisse, wie Terrorismus, Kriege, Epidemien und wirtschaftlicher Krisen mit zunächst besonders dramatischen Folgen für den Luftverkehr z.T. verständlich.

7.3.1. Generelle Tauglichkeitseinstufung in einen Maßnahmenkatalog für Anwender

Alle Maßnahmen, bis auf die Betriebszeitenbeschränkungen, deren Wirkung in jedem Fall gegeben sind, die aber einerseits weitgehend eingeführt sind und die andererseits wegen ihrer restriktiven Wirkungen wenig Handlungsmöglichkeiten bieten sowie die Betriebsbeschränkungen (Verkehrsbeschränkung oder Ausschluss für nicht ausreichend lärmzertifizierte Flugzeuge), die in Deutschland bereits weitestgehend angewandt werden, wurden qualitativ auf ihre generelle Tauglichkeit zur Erreichung signifikanter **Lärmminderungswirkungen** untersucht. Ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass generelle Tauglichkeit hier pragmatisch bereits Realitätsbezogenheit mit einschließt; d.h., dass für jede dieser Maßnahmen die theoretische Lärmminderungsfähigkeit, als Vorbedingung der Untersuchungen zur Tauglichkeit geprüft und als gesichert eingestuft worden war.

In der bei den Flughäfen durchgeführten Erhebung wurden von den Flughäfen für alle Maßnahmen ihre möglichen Auswirkungen auf den **Luftverkehr**, die **Wirtschaft**, die **Akzeptanz bei den Lärmbetroffenen** und ihre **Praktikabilität** bewertet. In die Tauglichkeitsbewertung ging vorrangig die Einschätzung der Lärmminderung ein. Die zweitgrößte Gewichtung erhielt die Praktikabilität, gefolgt von der Bewertung möglicher negativer direkter Folgen für den Luftverkehr und möglicher negativer indirekter Folgen für die Wirtschaft. Die auch von den Flughäfen durchgeführten Einschätzungen der Maßnahmenakzeptanz bei den Lärmbetroffenen, für die hohe Korrelationen mit der Bewertung der Lärmminderungspotentiale erwartet wurden, erbrachten insofern nur teilweise parallele Ergebnisse, als die Akzeptanz fast aller Maßnahmen – also auch der als wenig geeignet oder untauglich bewerteten – positiv eingeschätzt wurde, wenn auch in sehr unterschiedlichem Grade. Nur die Akzeptanz der Maßnahme „Incentives für Leistungsanbieter“ wurde insgesamt indifferent bewertet.

Zusammengefasst ergaben sich folgende Bewertungen der untersuchten Maßnahmen, die im Ergebnis Gegenstand des Maßnahmenkatalogs für Anwender sind. Die Reihenfolge der Darstellung kann dabei als Rangfolge für gute bis weniger gute Tauglichkeit für eine Anwendung unter derzeitigen generellen Rahmenbedingungen gelten. Dies schließt nicht aus, dass die Bewertung der Tauglichkeit im Einzelfall aufgrund spezieller Gegebenheiten, die sich z.B. auch aus der Funktion und den Betriebsabläufen bestimmter Flughäfen ergeben, davon abweichen kann:

1. **Start- und Landegebührenspreizung nach ICAO-Lärmzertifizierung**
   Bewertungen positiv für alle Kategorien; indifferent nur für Kategorie Wirtschaft
2. **Individuelle Verfolgung von Lärmverstößen**
   Bewertungen positiv für Kategorien Lärmminderung, Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorien Luftverkehr und Wirtschaft
3. **Start- und Landegebührenspreizung nach gemessenem Lärm**
   Bewertungen positiv für Kategorien Lärmminderung, Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorie Wirtschaft und leicht negativ für Kategorie Luftverkehr
4. **Incentives für Lärmbetroffene**
   Bewertungen positiv für Kategorien Lärmminderung, Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorie Luftverkehr und negativ für Wirtschaft
5. **Modal Split Beeinflussung**
   Bewertungen positiv für Kategorien Lärmminderung, Luftverkehr und Akzeptanz; negativ für Kategorien Praktikabilität und Wirtschaft
6. **Incentives für Leistungsanbieter**
   Bewertung positiv für Kategorie Lärmminderung; indifferent für alle anderen Kategorien
7. **Mediation**
   Bewertung positiv für Kategorie Lärmminderung und Akzeptanz; indifferent für Kategorien Luftverkehr und Wirtschaft; negativ für Kategorie Praktikabilität. Die negative Bewertung der Praktikabilität erfolgte hauptsächlich wegen der Erfahrungen mit dem Frankfurter Mediationsverfahren in seiner komplizierten und formal vorgegebenen Form. Im Verlauf des Vorhabens wurden auch formal weniger strukturierte Verfahren bis hin zum „Runden Tisch“ als Mediationsverfahren eingestuft (S. Maßnahmenbeschreibung unter 7.2.2). Diese wurden hinsichtlich ihrer Praktikabilität im Zeitverlauf zunehmend positiver beurteilt.
8. **Immobilien- und Flächennutzungspolitik**
   Bewertungen positiv für Kategorien Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorien Lärmminderung und Luftverkehr; negativ für Kategorie Wirtschaft

Für die verbleibenden untersuchten Maßnahmengruppen – Bewegungskontingent, Lärmkontingent, Bewegungs-/Lärmkontingent, Frequenzbegrenzung Flugzeuggrößenbeeinflussung, Flughafenkooperation mit Fluglärmminderungsziel und administrative Verkehrsverlagerung – wurden jeweils mindestens drei Kategorien, vor allem fast immer die Praktikabilität, negativ bewertet. Dies bedeutet, dass die Tauglichkeit dieser Maßnahmen für den Praxiseinsatz derzeit so gering einzuschätzen ist, dass sie zumindest nicht generell im Rahmen eines Maßnahmenkatalogs zu empfehlen sind.

Abweichend von den Maßnahmengruppen, die vorrangig den Bewertungen der Flughäfen folgend, als eher untauglich eingestuft wurden, halten wir jedoch **Lärmkontingente** als für zukünftig geeignete Maßnahmen. Dies, weil sie als transparent, gut überprüfbar, zielgenau und ergebnissicher einzustufen sind. Obwohl insgesamt restriktiv, bieten sie den Fluggesellschaften andererseits noch Handlungs- oder Reaktionsmöglichkeiten. Zur Zeit sind allerdings noch ungelöste Probleme, wie die Vereinbarung konsensfähiger Mess- bzw. Berechnungsverfahren, rechtliche Probleme, hoher organisatorischer Aufwand und operative Schwierigkeiten zu lösen.

7.3.2. Rahmenbedingungen des Einsatzes von Maßnahmen und spezielle Eignung

Start- und Landegebührenspreizungen auf der Grundlage der ICAO-Lärmzertifizierungen eignen sich für alle Flughäfen zur Erzielung von Lärmminderungen. Sie ermöglichen variantenreiche Gestaltungsmöglichkeiten auch im Rahmen der gültigen Zertifizierungen, da auch das Kapitel 3 und die Bonusklasse grundsätzlich weitere Gebührenspreizungen durch Zuordnung unterschiedlich lauter Flugzeugtypen zu mehreren flughafenspezifisch zu bestimmenden Lärmkategorien mit zielgerichteten Lärmzuschlägen ermöglicht. Diese Maßnahmen sind auch in besonderer Weise zur Verringerung des Nachtfluglärms geeignet, da die Nachtzuschläge in Kombination mit den Spreizungen nach Lärmkategorien weitere Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Zusätzlich können weitere tageszeitliche Differenzierungen etwa stundenweise innerhalb der Nachtstunden, statt lediglich eine Unterscheidung nach Tag und Nacht, eingeführt werden.

Die sachgerechteste Anwendung der **Start- und Landegebührenspreizung** ist im Grundsatz die **nach gemessenem Lärm**. Voraussetzung für die Einführung dieses Verfahrens ist die Installation und der lückenlose Betrieb eines Fluglärmmesssystems, dessen Vorhaltung sich erst für große Flughäfen mit entsprechendem Verkehrsaufkommen eignet.

Diese technischen Voraussetzungen müssen im übrigen auch für die Anwendung einer **individuellen Verfolgung von Lärmverstößen** vorliegen. Die regelmäßige und routinemäßige Anwendung dieser Maßnahme bedarf auch noch einer rechtlich vereinfachten Kooperationsregelung bezüglich der Regelungen des Datenaustausches zwischen Flugsicherung und Flughäfen.

Bei der Anwendung von **Incentives für Lärmbetroffene** sind „weiche“ Maßnahmen, die lediglich zu einer erhöhten Akzeptanz oder Lärmtoleranz der Betroffenen beitragen können, von solchen zu unterscheiden, die die Lärmexposition von Betroffenen vermindern. Zu ersteren gehören regelmäßige aktive und prospektive Informationen der Bevölkerung über Planungen, Entwicklungen und besondere Betriebsabläufe eines Flughafens mit Einflüssen auf die Lärmbelastung. Sie sollten von Flughäfen vor allem bei temporären Lärmbelastungen (außergewöhnliche Verkehrsaufkommen in der Nacht, Einsatz anderer Flugzeuge, zeitweilige Änderungen der Start- und Landebahnnutzungen etc.) eingesetzt werden. Eine Verminderung der Lärmexposition der Betroffenen kann durch passive Schallschutzmaßnahmen im Flughafenumfeld und Umsiedlungshilfen für Lärmbetroffene erreicht werden. Diese Maßnahmen eignen sich wegen hoher Kosten für Flughäfen mit einer relativ geringen Zahl stark lärmbetroffener Bevölkerung im Umfeld. Da die Maßnahmen nicht lärmmindernd wirken, sind vor Anwendung unbedingt Bevölkerungsprognosen für das Flughafenumfeld zu berücksichtigen, um das Risiko künftig hoher Folgekosten auszuschließen.

Eine **Modal Split Beeinflussung**, also eine Verlagerung von Verkehr auf einen anderen Verkehrsträger mit Wettbewerbsmitteln, ist für Flughäfen sehr schwierig. Das Verkehrsangebot wird zunächst von den Fluggesellschaften und Reiseveranstaltern bestimmt. Möglichkeiten einer Verlagerung auf einen anderen Verkehrsträger, z.B. Bahn, hängen von der Lage des jeweiligen Flughafens und der Verkehrsinfrastruktur seines Umfelds ab, wie direkter oder im Einzugsbereich vorhandener (Fern-)Bahnhof mit leistungsfähiger Direktverbindung zu einem (HUB-)Flughafen. Hierauf und das Wettbewerbsverhalten anderer Verkehrsträger hat ein Flughafen keinen direkten Einfluss. Liegen entsprechende Rahmenbedingungen vor, kann eine Modal Split Beeinflussung z.B. durch Incentives für Leistungsanbieter erzielt werden. Das bedeutet, dass eine Fluggesellschaft vom Flughafen z.B. Vergünstigungen erhält, für die sie im Gegenzug Flüge auf einer bestimmten Relation einschränkt oder einstellt. Eine Veränderung des Modal Split kann sich dann in der Folge ergeben, wenn dieses Luftverkehrsaufkommen ganz oder teilweise auf einen anderen Verkehrsträger übergeht.

Incentives für Leistungsanbieter zur Minderung nächtlichen Fluglärms wären Vergünstigungen, die Flughäfen Fluggesellschaften dafür gewähren, dass gezielt bestimmte Flüge mit leiserem Gerät durchgeführt werden oder von der Nacht auf den Tag verschoben werden. Letzteres setzt jedoch eine entsprechende Kapazitätssituation des Flughafens und des je-

weiligen Zielflughafens voraus. Anwendungen dieser Maßnahmen sind jedoch mit dem Risiko von Verstößen gegen den wettbewerbsrechtlichen Gleichbehandlungsgrundsatz belastet (S.7.2.2).

Wie oben angedeutet, wurde der Begriff **Mediation**, der ursprünglich nur für ein mit formal festgelegten Abläufen und Teilnehmern präzise vorgegebenes Verfahren verwendet wurde, im Projektverlauf auch für variablere und einfachere Verfahren bis hin zum „Runden Tisch“ verwendet. Kernbestandteil blieb, dass die Beteiligten über Informationsaustausch, Diskussion und Verhandlungen im Konsens beschlossene Ergebnisse vereinbaren. Dieses Verständnis von Mediation wurde in Stellungnahmen von Flughäfen und Fluggesellschaften im Zeitverlauf an uns herangetragen und wegen verbesserter Praktikabilität erkennbar stärker als sinnvolles Vorgehen zur Abstimmung und Einführung unterschiedlicher Maßnahmen akzeptiert. Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg solchen Vorgehens ist, dass möglichst bereits operationalisierte Zielsetzungen vor Beginn allen zu Beteiligenden bekannt sind und von diesen geteilt werden. Unscharfe oder grundsätzlich kontroverse Zielsetzungen sollten nicht Gegenstand von Mediationsverfahren sein. Ebenso sollten Mediationsverfahren nur eingesetzt werden, wenn die Zahl der zu Beteiligenden klein ist.

Wie der passive Schallschutz (S. Incentives für Lärmbetroffene) mindern Maßnahmen der **Immobilien- und Flächennutzungspolitik** oder der Landnutzung nicht den Fluglärm, verringern aber die Lärmbelastung der Bevölkerung im Flughafenumfeld. Das Ziel ist dabei nicht, Lärmbetroffene durch bauliche Maßnahmen, sondern durch ausreichende Distanz zum Flughafen vor Lärm zu schützen. Die Flächennutzung könnte prinzipiell so gestaltet werden, dass unter Berücksichtigung zunehmender Lärmimmissionen durch stark wachsenden Luftverkehr und auch zunehmendem Betriebsflächenbedarf von Flughäfen, ein nachhaltiger Schutz der Bevölkerung im Flughafenumfeld erreicht wird. Die zu erhaltenden oder erst zu schaffenden Distanzflächen können baulich teilweise durchaus durch weniger lärmsensibles Gewerbe genutzt werden. Bisher werden solche Maßnahmen wegen rechtlicher Probleme und fehlender Kompetenzen der Flughäfen kaum angewandt. Ebenso erschweren konkurrierende Planungshoheiten und ein starker Wettbewerb unter den Gebietskörperschaften eine wirksame Anwendung. Hier wird künftig verstärkter Handlungsbedarf zur Schaffung praktikabler Verfahren und sogar Anpassung des Planungsrechts liegen müssen, wegen der zu erwartenden besonders nachhaltigen Wirkungen solcher Maßnahmen.

7.3.3. Ausgestaltungsanforderungen und Anwendungsdefizite

Die bewertende Analyse der Maßnahmen zeigte, dass die Ausgestaltungsanforderungen für einzelne Maßnahmen nur schwer zu erfüllen sind. Dies ist einerseits eine Folge der Maßgabe, dass bei der Anwendung immer auf ein ausgewogenes Verhältnis von Ökologie, sprich Verkehrs-/Lärmminderungswirkung und Ökonomie, also der finanziellen Belastung des Luftverkehrs etc., zu achten ist. Andererseits konnten auch deutliche Anwendungsdefizite festgestellt werden, wie das folgende Beispiel der Anwendung lärmdifferenzierter Start- und Landeentgelte am Flughafen Frankfurt zeigt.

Das Bild gibt die Landegebührenentwicklung für ein definiertes Flugzeugbeispiel in Frankfurt ab 1990 bis zur Gegenwart wieder. Die Landegebühren setzten sich zunächst aus der gewichtsabhängigen Gebühr nach maximalem Abfluggewicht des Flugzeugs – hier einer B 747-400 mit 395 t MTOW –und einer pro Passagier erhobenen Passagiergebühr – hier für 280 Passagiere im Interkontinentalverkehr – zusammen. Wegen der bestehenden Korrelationen zwischen Flugzeuggröße, Gewicht und Lärm kann die Gewichtskomponente auch als lärmabhängige Komponente bezeichnet werden, zu der noch Lärm- und Schallschutzzuschläge – wie hier ab 2001 – hinzukommen können. Diese wurden hier sämtlich unter der grün dargestellten gewichtsabhängigen Gebühr subsumiert.

Das Beispiel zeigt, dass sich ab 1998 das Verhältnis der lärmabhängigen Komponente zur Passagiergebühr insgesamt umgekehrt hat. Trotz weiterer aktuell bis zu sechs unterschiedli-

cher Zuschläge für Lärm- und Schallschutz, die hier immer in den grünen Säulen enthalten sind, hat sich das bis zur Gegenwart nicht geändert.

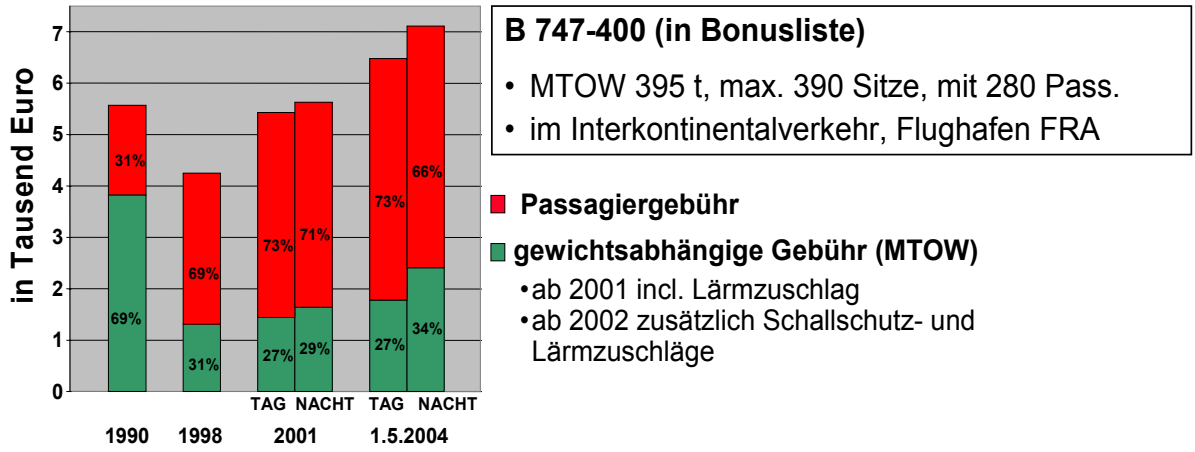


Abbildung 7-2: Landegebührenentwicklung – Beispiel Flughafen Frankfurt

Wegen der Absenkung dieser Komponente und der überproportionalen Anhebung der Passagiergebühr (im Beispiel über 170 %) wird die Wirksamkeitsschwelle lärmabhängiger Landegebühren möglicherweise nicht erreicht. Von keinem Flughafen wurden im übrigen empirische Belege für lärmmindernde Wirkungen der Landegebühren in Abhängigkeit von ihrer Ausgestaltung erbracht.

Die Folgen sind, dass unter diesen Umständen für Fluggesellschaften auch nicht ausgelastete Flüge attraktiv sein können, was sich tendenziell kontraproduktiv auf Lärmminderungsziele auswirkt. Bezogen auf das Beispiel sei auch erwähnt, dass über den Betrachtungszeitraum die Wachstumsrate der Gesamtlandegebühr, mit durchschnittlich 1,76% pro Jahr, nur in etwa die Inflationsrate ausglich und somit keine reale Erhöhung stattfand.

7.3.4. Theorieorientierte Ansätze zur Wirkung von Maßnahmen

In Punkt 7.3.1 konnte die Tauglichkeit der unterschiedlichen Instrumente mehr unter einem generellen Blickwinkel festgestellt werden. Es stellt sich nun die Frage, warum trotzdem die Akzeptanz der Instrumente, insbesondere der mehr marktwirtschaftlich orientierten, seitens der betroffenen Bevölkerung vielfach eingeschränkt ist. Die Behauptung ist, dass diese Instrumente in der Regel von geringer Wirksamkeit seien. Seitens der Flughäfen erhält man dazu jedoch kaum Informationen, sie führen so gut wie keine Wirksamkeitsanalysen zum Einsatz ihrer Maßnahmen oder auch zur Kombination von Maßnahmen durch. Sie verweisen vielmehr auf die in den letzten Jahren erreichten Lärmreduktionen, die jedoch anerkanntermaßen in erster Linie durch die Ausmusterung des nach ICAO Kapitel-2 zertifizierten Fluggeräts erreicht wurden. Da diese nun an den meisten Flughäfen abgeschlossen ist, sind auf diesem Weg keine weiteren Reduktionen zu erwarten, bei steigendem Verkehrsaufkommen dagegen eher ein Lärmanstieg. Im Folgenden soll versucht werden, Ansätze aus der ökonomischen, speziell der mikroökonomischen Theorie zu nutzen, um Erklärungen für die Reaktionen der Flughäfen zu finden.

7.3.4.1. Konsequenzen der Marktstruktur für Gebührenentwicklung und –politik

Während sich die Makroökonomische Theorie mit der Entwicklung der Gesamtwirtschaft und ihren Beeinflussungsdeterminanten beschäftigt, stehen bei der mikroökonomischen Theorie Branchen im Vordergrund und das Verhalten einzelner Unternehmen innerhalb einer Branche auf den für sie relevanten Märkten. Im konkreten Fall geht es darum, Erklärungsansätze

für das Verhalten von Flughäfen und Fluggesellschaften auf Märkten für Start- und Landerechte (Slots) zu finden. Anbieter sind die Flughäfen, Nachfrager die Fluggesellschaften, das Gut ist der Slot. Das Problem in diesem Zusammenhang ist, dass die Nutzung des Gutes Slot mit externen Effekten in der Form von externen Kosten verbunden ist und das „öffentliche Gut Ruhe“ beeinträchtigt ist.

Zuerst soll der Zusammenhang zwischen Marktstruktur und Preisfestsetzung dargestellt werden. Zu betonen ist dabei, dass die Nachfrager der Leistungen des Flughafens nicht die Quell- und Zielpassagiere der betroffenen Region sind, sondern die Fluggesellschaften. Die Passagiere als auch die Fracht stellen dagegen das wichtigste „Guthaben“ des Flughafens dar, das Pfund, mit dem er wuchern kann. Die Fluggesellschaften, die dieses Potential für sich nutzen möchten, sind darauf angewiesen, den jeweiligen Flughafen dieser Region zu bedienen. Damit stellen die meisten Flughäfen für das Einzugsgebiet ihrer Region den einzigen Zugang dar; als Anbieter der Slots repräsentieren sie demnach ein regionales Monopol.[1] Mit dieser Monopolsituation ist in der Regel auch die staatliche Einflussnahme auf die Gebührenpolitik begründet, um „Monopolgewinne“ zu vermeiden.

Auf „normalen“ Märkten bestimmt allein die Preishöhe die Menge der Nachfrage, die „unsichtbare Hand des Marktes“ reguliert die Preis-Mengen-Kombination, so dass in der Regel alle Marktteilnehmer ihr zufrieden stellendes Auskommen haben. Grundsätzlich gilt dabei: je höher der Preis, desto geringer die Nachfrage. Dies gilt jedoch nur, wenn eine größere Anzahl Anbieter und Nachfragender – eine polypolistische Marktstruktur – vorhanden ist. Die Wettbewerbsintensität auf solchen Märkten ist jedoch aufgrund mangelnden Preis- und Produktwettbewerbs denkbar gering. Die höchste Wettbewerbsintensität liegt dagegen im weiten Oligopol vor, d.h. die Zahl der Anbieter ist abzählbar gering.[2] Je enger das Oligopol wird, desto größer ist die Gefahr von unerlaubten Absprachen, desto geringer ist in der Regel auch die Wettbewerbsintensität, bis sie im Monopol auf Null sinkt. Monopolgewinne (Monopolrenten) sollen mittels Regulierung verhindert werden.

Auf den ersten Blick scheint im Fall der Nachfrage nach Slots eine polypolistische Marktstruktur gegeben zu sein, werden die meisten Flughäfen doch in der Regel von mehr als einer Fluggesellschaft angeflogen. Tatsächlich lassen sich auch auf der Nachfragerseite monopolistische Tendenzen erkennen, insbesondere auf den Flughäfen, auf welchen eine Gesellschaft eine dominante Position hält. Berücksichtigt man ferner die jüngste Entwicklung der Allianzenbildung im internationalen Luftverkehr, erkennt man auf den meisten Flughäfen eine weitere Verstärkung des Monopolisierungsgrads. In der Regel ist dies die Allianz der ehemals nationalen Fluggesellschaft, in Deutschland also in der Regel die Lufthansa mit ihren Star Alliance-Partnern. Die Nachfrage entspricht somit in der Regel einem Teilmonopol.

Die Theorie beschäftigt sich sehr viel seltener mit Marktmachtgegebenheiten auf Nachfragerals auf der Angebotsseite, noch weniger, wenn beide Marktseiten vergleichbar starke Positionen innehaben. In einem zweiseitigen (Teil-)Monopol ist nun zu fragen, ob beide Seiten in gleicher Weise ihre Marktmacht ausnutzen können. So ist eine Liniengesellschaft, will sie die Nachfrage einer bestimmten Region bedienen, auf den Flughafen der Region angewiesen; dagegen kann sie Umsteigeverbindungen sehr viel leichter von einem Flughafen zu einem anderen transferieren. Die Menge der versunkenen Kosten, die bei einem Wechsel „verloren“ sind, ist geringer als bei einem Flughafen, der die Immobilie weder transferieren noch anderweitig nutzen kann. Bei vergleichbarer Marktmacht geht nun die Theorie von einer Verhandlungslösung aus, um die optimale Preis – Mengen – Relation für das Produkt zu finden. Eine Regulierung muss in einem solchen Fall nicht notwendigerweise als „Marktsurrogat“ eingesetzt werden.

Sieht man jüngere Entwicklungen einiger Flughäfen in ihrem Bestreben, Alternativen zur Regulierung zu finden, findet man genau die von der Theorie zu erwartende Verhaltensweise

[1] Die Monopolsituation des Flughafens beschränkt sich auf seine Funktion als Infrastrukturlieferant.
[2] Dieser Fall trifft beispielsweise zu, wenn ein Low-Cost-Carrier einen neuen Flughafen in Deutschland anfliegen möchte und sich nicht auf eine Region festlegen lässt.

einer Verhandlungslösung zwischen Angebot und Nachfrage, wie das Beispiel Frankfurt zeigt. Durch diese Verhandlungslösung ist es den Fluggesellschaften gelungen, die Flughäfen an ihrem Risiko zu beteiligen. Ursprünglich war die Landegebühr vorrangig gewichtsabhängig und wurde nur um einen geringen Aufschlag als Passagierentgelt ergänzt. Diese Entwicklung hat sich umgekehrt, so dass heute der passagierabhängige Anteil der Landegebühr deutlich größer ist als der gewichtsabhängige (S. 7.3.3). Dies hatte jedoch die Nebenwirkung, dass der lärmbezogene Anteil – auch wenn er prozentual an der gewichtsabhängigen Landegebühr stieg – absolut sank oder stagnierte, bedingt durch den Rückgang der gewichtsabhängigen Gebühren.

Diese zweiseitige Verhandlungslösung über das Gut des Slots hat jedoch die Nebenwirkung des Lärms. Dies wiederum hat zur Folge, dass zwei „Vertragsparteien“ über ein Gut entscheiden, während ein Teil der direkt Betroffenen dieses Gutes von der Verhandlungslösung ausgeschlossen ist. Es ist auch nicht zu erwarten, dass die beiden Verhandlungspartner die Interessen des „Ausgeschlossenen“ mit berücksichtigen, im Gegenteil werden dessen Interessen eher als hinderlich für die eigene Entwicklung angesehen. Lärmreduktion ist für sie höchstens ein sekundäres Ziel, wenn nicht sogar ein negativ belastetes Ziel. Daher ist davon auszugehen, dass bei einer Fortsetzung dieser Politik der zweiseitigen Verhandlungslösung mit einer weiteren Verschlechterung der Beziehung zwischen der Luftfahrtbranche, bestehend aus Flughafen und Fluggesellschaft, und der betroffenen Bevölkerung zu rechnen ist.

Muss eine Behörde als Vertreter der öffentlichen Hand das Ergebnis einer solchen Verhandlungslösung noch genehmigen, ist dieses Dilemma im Regelfall nicht gelöst. Selbstverständlich hat die öffentliche Hand das öffentliche Interesse und somit auch die Interessen der Anwohner zu vertreten. Aber die Erfahrung der Regulierung hat über die Jahre hin gezeigt, dass die Verbindung zwischen Regulierer und Reguliertem in der Regel intensiver ist als das zwischen Regulierer und den zu Schützenden. Soweit der Flughafen nicht privatisiert ist, ist die öffentliche Hand in einem Zielkonflikt: Als Eigner des Flughafens hat sie ein Interesse an seinem finanziellen Wohlergehen. Daneben hat sie selten definierte „öffentliche Interessen“ zu verfolgen, die einerseits Sicherstellung von Arbeitsplätzen und andererseits Schutz der Bevölkerung vor Fluglärm sind.

Um aus diesem Dilemma herauszukommen, ist eine Privatisierung sinnvoll, ergänzt um eine Verhandlungslösung, an der alle Betroffenen beteiligt sein sollten. Dabei wäre jedoch sicherzustellen, dass tatsächlich einvernehmliche Lösungen gefunden werden, um nicht im Sinn einer demokratischen Lösungsfindung Mehrheitsentscheidungen zu Lasten einer Minderheit durchzusetzen. Das Misslingen des Mediationverfahrens in Frankfurt zeigt, dass es an einer ausreichend ausgeprägten „Streitkultur“ fehlte, um tatsächlich einvernehmliche Lösungen zu finden. Unter Umständen könnte auch eine Trennung der Verhandlung zwischen der allgemeinen Landegebühr und der ökologischen Komponente überlegt werden, um die dreiseitige Verhandlung auf einen kleineren Teilbereich zu konzentrieren. Eine weitere Lösungsmöglichkeit könnte in der Einführung eines „Lärmtalers“ liegen, sofern er bei der betroffenen Bevölkerung auf Akzeptanz stößt. In Zürich wurde eine solche Lösung überlegt.

7.3.4.2. Preisgestaltungsgrundsätze / Preisreagibilität

Zur Anwendung der mikroökonomischen Theorie über die Zusammenhänge zwischen Marktstruktur und Marktverhalten muss berücksichtigt werden, dass dies nur bei einer zumindest teilweisen Aufhebung der bisherigen Regulierung gilt, wie es am Beispiel von Frankfurt der Fall ist. Im Normalfall der deutschen Flughäfen gilt immer noch eine „cost-plus-Regulierung“, nach der die Flughäfen der Genehmigungsbehörde ihre Kosten vorlegen und entsprechend die Gebühren genehmigt bekommen. In Frankfurt muss dagegen der ausgehandelte Preis nur noch von der Genehmigungsbehörde, die schon an den Verhandlungen teilgenommen hat, akzeptiert werden.

Die Ausgangsbasis der mehr theoretischen Diskussion war die mangelnde Wirksamkeit bzw. Wirksamkeitskontrolle seitens derjenigen, die für den Einsatz der Instrumente verantwortlich sind. Das zweiseitige Monopol, das sicher nicht an allen Flughäfen in gleicher Weise Gültigkeit besitzt, kann Ursache dafür sein, muss es aber nicht. Für die Maßnahme der lärmorientierten Gebührenpolitik als der wohl am häufigsten eingesetzten Maßnahme lässt sich auch fragen, ob die Reagibilität der Betroffenen in irgend einer Weise eingeschränkt ist. Ein erster Schritt dazu ist die Feststellung, dass nach ICAO-Norm eine Gebühr nicht der Gewinnmaximierung dienen darf, sondern allein der Kostendeckung. Dies hat zur Folge, dass dem Preis nicht die gleiche Markträumungsfunktion zukommt wie auf Märkten, die Gewinnmaximierung zulassen. In diesem Zusammenhang ist bisher noch nicht entschieden, ob der Lärmzuschlag eine Gebühr oder einen Preis darstellt.

Ein staatlich-administrierter Preis kann in der Regel nicht die Funktion eines Knappheitspreises übernehmen, wie es normalerweise bei knappen Gütern ist. Da für das knappe Gut „Ruhe“ kein Markt besteht, ist es nicht ohne weiteres möglich, einen an Kosten orientierten Preis festzulegen. Die Internalisierung solcher externer Kosten wird in der Regel mittels eines Preisaufschlags gemacht, der die Knappheit widerspiegeln soll, jedoch kaum objektiv festgelegt werden kann. Ideal wäre es, sämtliche Betroffenen an der Preisfindung zu beteiligen.

Wenn derzeit der Lärmausstoß als zu hoch angesehen wird, ist der aktuelle lärmbezogene Preisaufschlag zu gering. Geht man von einem rationalen Marktverhalten bei einer nicht gegen Null tendierenden Preiselastizität aus, dann müsste bei steigendem Preis entsprechend die Ausstoßmenge an Lärm zurückgehen. Dies bedeutet in erster Linie nicht eine Reduktion von Flugbewegungen, sondern kann auch durch eine Änderung des Flottenmixes oder anderer technischer Maßnahmen erreicht werden. In diesem Bereich ist die Reagibilität der Fluggesellschaften jedoch eingeschränkt, da die Entscheidung, Änderungen an der Flotte oder auch technische Änderungen an einzelnen Fluggeräten vorzunehmen, in der Regel längerfristiger Natur ist und von daher keine kurzfristigen Reaktionen erwartbar sind. Letztlich ist auch zu berücksichtigen, wie hoch die Preiselastizität der Endkunden ist, da die Fluggesellschaften versucht sein werden, die für sie höheren Kosten an ihre Kunden weiterzuleiten. Dabei ist davon auszugehen, dass die Elastizität der Flugpassagiere höher sein dürfte als die der Frachtkunden, insbesondere der Kunden von Express- und Paketdiensten. Diese wiederum stellen jedoch das größte Aufkommen an Flügen in der Nacht.

Diese kurzen Überlegungen über die Reagibilität der einzelnen Marktpartner sollen die Schwierigkeiten andeuten, die mit einer Wirksamkeitsanalyse von Maßnahmen verbunden sind. Andererseits geben sie auch die Richtung vor, wo weiterer Forschungsbedarf besteht, um auf diesem Gebiet einer Lösung näher zu kommen.

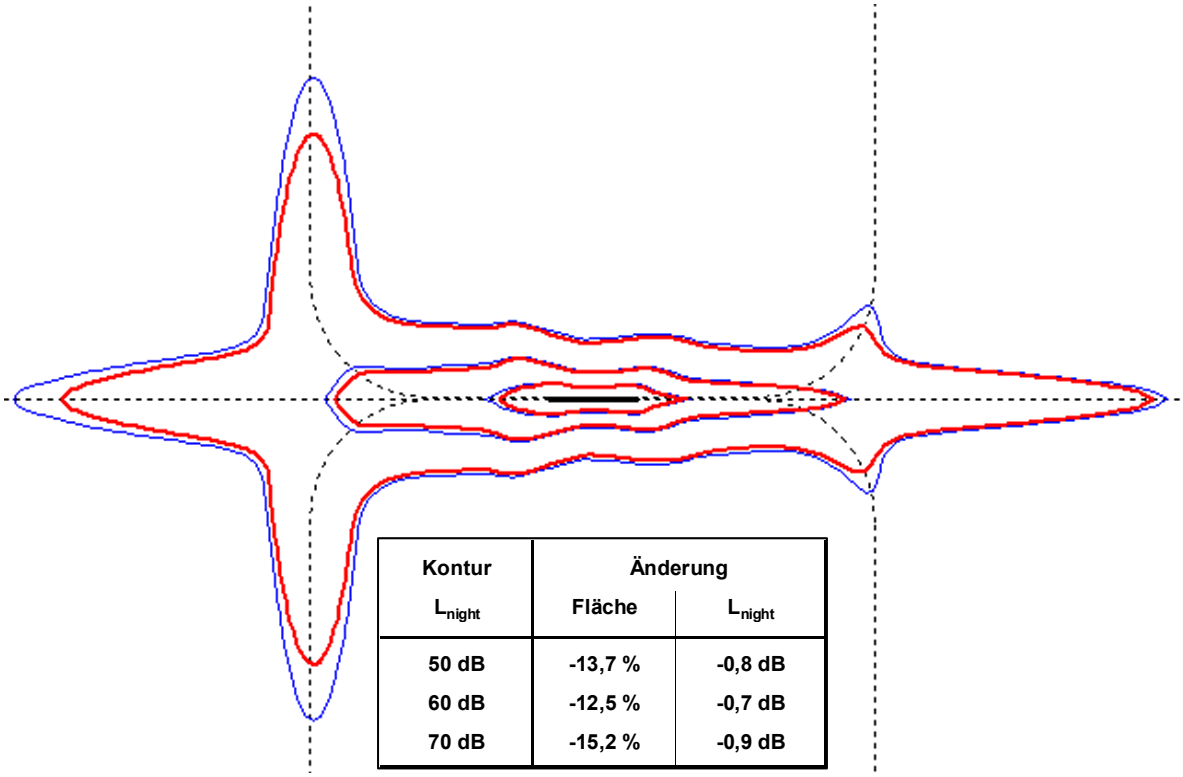
7.4. Strategiebeispiel zur Minderung des Nachtfluglärms für einen generischen Flughafen

Die Ansatzpunkte für Maßnahmen sollten sich an den Potentialen orientieren, mit denen bestimmte Flugzeuggruppen durch ihre Einsatzhäufigkeit zur Entstehung lärmbelasteter Flächen, also der Lärmkonturen, beitragen. Die Ergebnisse von Modellrechnungen haben gezeigt, dass z.B. die lärmbelasteten Flächen an einem Flughafen mit ca. 200.000 Bewegungen im Jahr und wenig Langstreckenverkehr in erster Linie von den kleineren zweistrahligen Flugzeugen (B737, B757 und A320) herrühren. So dass diese Flugzeuggruppe für wirkungsvolle Lärmminderungsmaßnahmen zu fokussieren wäre. An einem Flughafen mit ca. 500.000 Bewegungen im Jahr und viel Langstreckenverkehr wird der größte Beitrag dagegen von vierstrahligen Großflugzeugen verursacht, für die exemplarisch die B747 steht. Aber auch hier trägt die Gruppe der zweistrahligen Flugzeuge in bedeutendem Umfang zur gesamten lärmbelasteten Fläche bei. In solch einem Fall sollten demnach Lärmminderungsmaßnahmen gezielt bei beiden Gruppen ansetzen.

Wie eine Strategie für den letzteren Fall grundsätzlich aussehen könnte, und welche Ergebnisse damit zu erzielen wären, soll abschließend folgendes Rechenbeispiel zeigen. Dazu wurde das eigens für dieses Projekt entwickelte DLR-Analyseprogramm CEAR verwendet, das eine schnelle Analyse der Effizienz lärmmindernder Maßnahmen ermöglicht. Das Programm bietet folgende Möglichkeiten:

- Es kann Änderungen der Verkehrszusammensetzungen, der Betriebszeitenaufteilung, und der Bezugszeit (z.B. einen 24-Stunden-Tag, nur den Tag oder nur die Nacht) berücksichtigen.
- Es kann generische Flughäfen mit 1- und 2-Bahnsystem unterscheiden. Vorgegeben werden können zwei unterschiedliche, charakteristische Flugstreckengeometrien.
- Unabhängig von der Verkehrszusammensetzung können spezifische Pegelabsenkungen für einzelne Flugzeugkategorien modelliert werden. So können z.B. die Einflüsse technischer Lärmminderungsmaßnahmen simuliert werden.
- Für jeweils zwei Szenarien können Vergleichsrechnungen erstellt werden, um die Wirksamkeit untersuchter Maßnahmen darzustellen.

Das Rechenbeispiel geht von einem fiktiven Flughafen mit Einbahnbetrieb aus, dessen Verkehrszusammensetzung an einen typischen Nachtflugbetrieb angelehnt ist. Das Lärmminderungspotential wird abgeschätzt für die Ersetzung aller B747 mit einem Verkehrsanteil von 1% durch jeweils zwei B767. Ebenso soll der Startpegel der kleineren 2-motorigen Typen wie A320 mit einem Verkehrsanteil von 50% durch technische Modifikationen an den Flugzeugen um 1dB abgesenkt werden.



Kontur	Änderung	
L_{night}	Fläche	L_{night}
50 dB	-13,7 %	-0,8 dB
60 dB	-12,5 %	-0,7 dB
70 dB	-15,2 %	-0,9 dB

Abbildung 7-3: Strategiebeispiel zur Minderung des Nachtfluglärms: Konturen L_{night} (nach EU Umgebungslärmrichtlinie)

Das in Abbildung 7-3 dargestellte Ergebnis dieser Maßnahmen zeigt zunächst die Ausgangssituation mit den äußeren blauen Lärmkonturen. Ausgewiesen ist der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{night}, der als harmonisierter Deskriptor für die nächtliche Lärmbelastung in der EU-Umgebungslärmrichtlinie definiert ist.

Die inneren roten Lärmkonturen repräsentieren den Effekt der angewandten Maßnahmen. Sie zeigen deutliche Verkleinerungen der lärmbelasteten Flächen. Die Flächen der dargestellten Konturen verringern sich zwischen 12,5 und 15,2%. Was einer durchschnittlichen Minderung des L_{night} zwischen 0,7 und 0,9 dB entspricht.

7.5. Zusammenfassung

Im Hauptarbeitspaket 4 wurde zunächst ein Vergleich von 590 Verkehrsflughäfen weltweit in Bezug auf die Anwendung von Lärmminderungsmaßnahmen untersucht. Es konnten zehn Maßnahmengruppen identifiziert werden, die von den Flughäfen zum Teil in sehr unterschiedlicher Ausprägung angewendet werden.

Neben diesen international dokumentierten Maßnahmen wurden solche untersucht, die teilweise noch nicht oder nur in Deutschland und angrenzenden Staaten angewendet werden. Es lassen sich folgende Maßnahmengruppen unterscheiden: direkt lärmbezogene Maßnahmen (lärmabhängige Start-/Landegebühren, Lärmkontingente, Lärmpegelbegrenzungen), indirekte oder flugbewegungsbezogene Maßnahmen (Betriebszeitenbeschränkungen, Bewegungskontingent, Frequenzbegrenzung, Flugzeuggrößenbeeinflussung, Flughafenkooperation, administrative Verkehrsverlagerung, Modal Split Beeinflussung), Lärm- und Flugbewegungsbezogene Maßnahmen (Betriebszeitenbeschränkung, Bewegungs-/Lärmkontingentierung), vorgelagerte Verfahren zur Einführung von Maßnahmen (Mediation, Incentives für Leistungsanbieter, Verfolgung von Lärmverstößen); Maßnahmen zur Erhöhung der Lärmakzeptanz und zur Verminderung der Lärmexposition der betroffenen Bevölkerung (Incentives für Lärmbetroffene, Flächennutzungspolitik).

Die einzelnen Maßnahmen wurden mit Hilfe einer Literaturanalyse und einer Befragung der Umweltreferenten der 18 internationalen Flughäfen in Deutschland in Hinblick auf ihre Tauglichkeit für eine signifikante Lärmminderungswirkung überprüft. In der Erhebung wurden von den Flughäfen für alle Maßnahmen die möglichen Auswirkungen auf den Luftverkehr, die Wirtschaft, die Akzeptanz bei den Lärmbetroffenen und ihre Praktikabilität bewertet. Ergebnis ist eine Rangfolge von als besonders tauglich angesehenen Maßnahmen:

1. Start- und Landegebührenspreizung nach ICAO-Lärmzertifizierung
2. Individuelle Verfolgung von Lärmverstößen
3. Start- und Landegebührenspreizung nach gemessenem Lärm
4. Incentives für Lämbetroffene
5. Modal Split Beeinflussung
6. Incentives für Leistungsanbieter
7. Mediation
8. Immobilien- und Flächennutzungspolitik

Die bewertende Analyse der Maßnahmen zeigte, dass die Ausgestaltungsanforderungen für einzelne Maßnahmen nur schwer zu erfüllen sind. Dies ist einerseits eine Folge der Maßgabe, dass bei der Anwendung immer auf ein ausgewogenes Verhältnis von Ökologie, sprich Lärmminderungswirkung und Ökonomie, also den wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Akteure im Luftverkehr, zu achten ist. Andererseits konnten auch deutliche Anwendungsdefizite festgestellt werden.

Im weiteren Verlauf der Studie standen theorieorientierte Ansätze zur Wirkung von Maßnahmen im Vordergrund. Sie beinhaltet die Folgen der Marktstruktur im Luftverkehr für Ge-

bührenentwicklung und –politik. Hinzu kommt eine Darstellung der Preisgestaltungsgrundsätze und der Preisreagibilität.

Abschließend wurde ein Strategiebeispiel zur Minderung des Nachtfluglärms für einen generischen Flughafen entwickelt. Grundlage für die Berechnung war das DLR-Analyseprogramm CEAR. Das Rechenbeispiel geht von einem fiktiven Flughafen mit Einbahnbetrieb aus, dessen Verkehrszusammensetzung an einen typischen Nachtflugbetrieb angelehnt ist. Das Lärmminderungspotenzial wird abgeschätzt für die Ersetzung aller viermotorigen Boeing 747 durch jeweils zwei zweimotorige Boeing 767. Ebenso wurde der Startpegel der kleineren zweimotorigen Flugzeuge wie dem Airbus A320 durch eine hypothetische technische Modifikationen an den Flugzeugen um 1dB abgesenkt. Ergebnis ist eine Reduktion der Flächen der dargestellten Lärmkonturen (50, 60, 70 dB-Kontur) zwischen 12,5 und 15,2 %, was einer durchschnittlichen Minderung des L_{night} zwischen 0,7 und 0,9 dB entspricht.

7.6. Literatur

[7-1] Stefan Beyhoff et.al., Verkehrspolitische Optionen zur Lärmreduktion an Flughäfen, dargestellt am Beispiel des Flughafens Hamburg, DLR-FB 92-40, Köln 1992

[7-2] Frank Fichert, Umweltschutz im zivilen Luftverkehr – Ökonomische Analyse von Zielen und Instrumenten, Berlin 1999

[7-3] Umweltbundesamt (Hrsg.), Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Luftverkehrs, Köln 2000

[7-4] A.N. Bleijenberg, R.C.N. Wit, A European environmental aviation charge, Feasibility study, Delft 1998

[7-5] R.C.N. Wit, A.N. Bleijenberg, Potential economic distortions of a European environmental aviation charge – Background study, Delft 1997

[7-6] Stephan Zaß, Der Flughafen in seiner Region – Beschäftigungswirkungen von Flughäfen und Bevölkerungsentwicklungen im Flughafenumland; DLR, Köln 2000

[7-7] FAA Airport Division Southern Region (Hrsg.), Land Use Compatibility – A Guide for effective Land Use Planning, Atlanta 1999

[7-8] Geoffrey D. Gosling, Economics of Airport Noise Management, Institute of Transportation Studies Technology Transfer Program, 2004 Airport Noise Symposium, Berkeley, 2004

8. Fluglärmberechnungsverfahren

Arbeitspaket 5A: ***Dr. Ullrich Isermann, E-Mail:*** ullrich.isermann@dlr.de
DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,
Abteilung Technische Strömungen, Göttingen

8.1. Forschungsziel und -ansatz

Ziel des Arbeitspakets 5A war die Entwicklung eines Simulationsverfahrens, bei dem die Modellierung der Schallabstrahlung des Flugzeugs durch ein Teilschallquellenmodell erfolgt (wobei die im HAP 2 gewonnenen Erkenntnisse über die Schallentstehungsmechanismen mit herangezogen werden sollten). Als Grundlage wurde das am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung entwickelte *SIMUL-Verfahren* [8-1] herangezogen, das vor allem um ein verbessertes Quellmodell erweitert werden sollte. Außerdem sollte in dieses Prognoseverfahren das im AP 5B zu entwickelnde fortschrittliche Schallausbreitungsmodell integriert werden. So sollte gewährleistet werden, dass die Effekte von Topographie und Meteorologie in geeigneter Weise durch das Rechenverfahren berücksichtigt werden können.

Das Ergebnis sollte ein Rechenprogramm sein, das keinen maßgeblichen Beschränkungen hinsichtlich der Berechenbarkeit verschiedener Fluglärmdeskriptoren unterliegt und das vor allem als Entwicklungswerkzeug und zur Untersuchung problematischer Immissionsszenarien herangezogen werden kann.

Schließlich sollte eine Beschreibung für ein vereinfachtes Berechnungsverfahren erarbeitet werden, das den Anforderungen an ein praktikables, gesetzlich festschreibbares Modell genügt. Dieser Arbeitsschritt schien zunächst im Hinblick auf eine geplante Novellierung des Fluglärmgesetzes notwendig. Letztendlich führte diese Zielsetzung aber zu einer intensiven internationalen Zusammenarbeit im Rahmen der Arbeitsgruppe *AIRMOD* der European Civil Aviation Conference ECAC, bei der ein Fluglärmberechnungsverfahren erarbeitet werden sollte, das den Anforderungen an eine harmonisierte europäischen Lärmschutzpolitik [8-2,-3] Rechnung trägt.

8.2. Hintergrund

Die meisten derzeit national und international in der praktischen Anwendung befindlichen Fluglärmprognoseverfahren basieren auf einem relativ einfachen Berechnungsprinzip [8-4]: Die 3-dimensionale Flugbahn eines Flugzeugs wird durch ihre Projektion in die Horizontalebene (Verlauf der flughafenspezifischen *Flugstrecke*) und ein flugzeugspezifisches *Flughöhenprofil* bestimmt. Dieses Flughöhenprofil setzt sich in der Regel aus einzelnen Segmenten zusammen, längs derer die die Berechnung der Immissionswerte beeinflussenden Parameter (Schallabstrahlungseigenschaften, Triebwerksleistung und Fluggeschwindigkeit) in der Regel als konstant oder sich linear ändernd angenommen werden.

Die Schallabstrahlungseigenschaften eines Flugzeugs (Schallspektrum und Richtcharakteristik) werden bei derartigen *konventionellen Verfahren* meist nur grob berücksichtigt. In der Regel liegen für einen definierten Flugzeugtyp (oder eine Gruppe von vergleichbaren Typen) nur sog. *Noise-Power-Distance(NPD)-Kurven* vor, in denen Maximalschallpegel oder zeitintegrierte Schallpegel als Funktion von Ausbreitungsentfernung und Triebwerksleistung für einen idealisierten Horizontalflug mit konstanter Triebwerksleistung definiert sind.

Die verschiedenen konventionellen Verfahren unterscheiden vor allem hinsichtlich der Modellierung von gekrümmten Flugstrecken. Bei den einfachsten konventionellen Modellen wird der Beitrag eines Vorbeiflugs zur Schallimmission an einem vorgegebenen Ort für den

kleinsten Vorbeiflugabstand *(Distance of Closest Approach DCA)* und der für diese Geometrie gerade auftretenden Triebwerksleistung ermittelt. Ein Beispiel für ein derartiges DCA-Verfahren ist das deutsche *AzB-Verfahren* [8-5].

Standard sind mittlerweile sog. *Segmentierungsmodelle*, bei denen gekrümmte Flugstreckensegmente in lineare Teilstücke zerlegt werden. Der bekannteste Vertreter dieser Kategorie ist das *Integrated Noise Model INM* [8-6] der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA. Auch das auf europäischer Ebene durch die AIRMOD-Gruppe überarbeitete *ECAC Doc.29* ist ein Segmentierungsverfahren [8-8].

Am DLR-Institut für Strömungsmechanik im Rahmen von ICAO-Aktivitäten durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten konventionellen Verfahren bei vergleichbaren Randbedingungen (insbesondere identischen Eingabedaten) ähnliche Resultate erzielen [8-9]. Konventionelle Verfahren haben folgende Schwachstellen:

- Die Einflüsse von Richtcharakteristik und Schallspektrum werden in der Regel nur pauschal oder gar nicht berücksichtigt.
- Die Einflüsse der Fluggeschwindigkeit auf die Schallerzeugungsmechanismen (insbesondere den Umströmungslärm) gehen nicht ein.
- Topographische und meteorologische Effekte werden nicht oder vergleichsweise einfach modelliert.

Diese Defizite rühren u.a. vom Anwendungsziel (Berechnung/Prognose von Langzeitmittelwerten), von der Qualität der verfügbaren Eingabedaten sowie (aus historischen Gründen) von der benötigten Rechenkapazität her.

Eine Alternative zu den konventionellen Rechenverfahren bieten *Simulationsverfahren*. In der Vergangenheit war der mit derartigen Modellen verbundene Rechenaufwand noch ein wesentlicher Hinderungsgrund für ihren Einsatz. Beim derzeitigen Stand der Rechnertechnik ist diese Einschränkung mittlerweise jedoch aufgehoben. Bei Simulationsverfahren wird die Flugbahn eines Flugzeuges in diskrete Einzelpunkte zerlegt, an denen Fluggeschwindigkeit und Triebwerksleistung (also implizit die Schallabstrahlungseigenschaften) des Flugzeugs bekannt sein müssen. Unter Berücksichtigung der Schallausbreitungsgesetze und der Geometrie zwischen Flugzeug und Immissionsort kann dann an letzterem ein zeitlicher Schallpegelverlauf ermittelt werden, der im Idealfall einem gemessenen Verlauf entspricht.

Simulationsverfahren werden in der Regel eher im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt (Optimierung von Flugverfahren, Weiterentwicklung von konventionellen Modellen). Ein umfassender praktischer Einsatz wurde bisher vor allem dadurch verhindert, dass die für eine vollständige Simulation notwendigen akustischen Eingabedaten in vollem Umfang nicht verfügbar sind. Die Qualität der Datengrundlage bestimmt aber primär die Qualität einer Immissionsberechnung. Außerdem sollte bei einem praktischen Einsatz das gewählte Prognoseverfahren immer dem Anwendungszweck angepasst sein - so wird für prognostizierte Flugbetriebsfälle die Genauigkeit der Verkehrsprognose das Resultat stärker bestimmen als die Qualität des Berechnungsverfahrens.

Nur in der Schweiz ist ein Simulationsverfahren auch im praktischen Gebrauch [8-10]. Bei diesem Modell *(FLULA2)* werden die Abstrahlungseigenschaften des Flugzeugs halbempirisch auf der Basis umfangreicher Messungen insbesondere am Flughafen Zürich modelliert. Die entsprechende Datengrundlage ist also teilweise an dem dort auftretenden Typenmix orientiert. Auch werden durch das Modell einige physikalische Effekte (insbesondere der Geschwindigkeitseinfluss auf die Schallabstrahlungseigenschaften) nicht berücksichtigt.

Bei der Modellierung von Ausbreitungseffekten wird sich bei den gebräuchlichen Verfahren in der Regel auf die Einflüsse der atmosphärischen molekularen Dämpfung und der Dämpfung bei bodennaher Schallausbreitung beschränkt. Brechungs- und Beugungseffekte sowie Einflüsse der Topographie (die insbesondere bei bodennahen Operationen im direkten Flughafenbereich wichtig sind) werden in der Regel nicht berücksichtigt.

8.3. Das SIMUL-Verfahren

8.3.1. Prinzip eines Simulationsverfahrens

Das Prinzip des SIMUL-Verfahrens kann der Abb. 8-1 entnommen werden. Wie bei jedem Simulationsverfahren wird zunächst die Flugbahn als eine Folge von Punkten generiert, die im SIMUL-Verfahren in konstanten zeitlichen Abständen (typischerweise von 1 sec) vom Flugzeug passiert werden. Damit sind Emissionsort und –zeit festgelegt. Außerdem sind die räumliche Orientierung des Flugzeugs, seine Geschwindigkeit und die Triebwerksleistung bekannt. Die Flugbahn kann dabei entweder direkt aus dem Rechenprogramm unter Vorgabe eines bestimmten Flugverfahrens ermittelt werden, oder es kann über eine Schnittstelle auf externe Daten (z.B. Flugsimulatordaten) zugegriffen werden.

An jedem Punkt der Flugbahn sind somit die Schallabstrahlungseigenschaften des Flugzeugs (beschrieben durch spektrale Informationen sowie Informationen zur Abstrahleigenschaft) bekannt. Sie werden durch die Triebwerksleistung und die Fluggeschwindigkeit bestimmt.

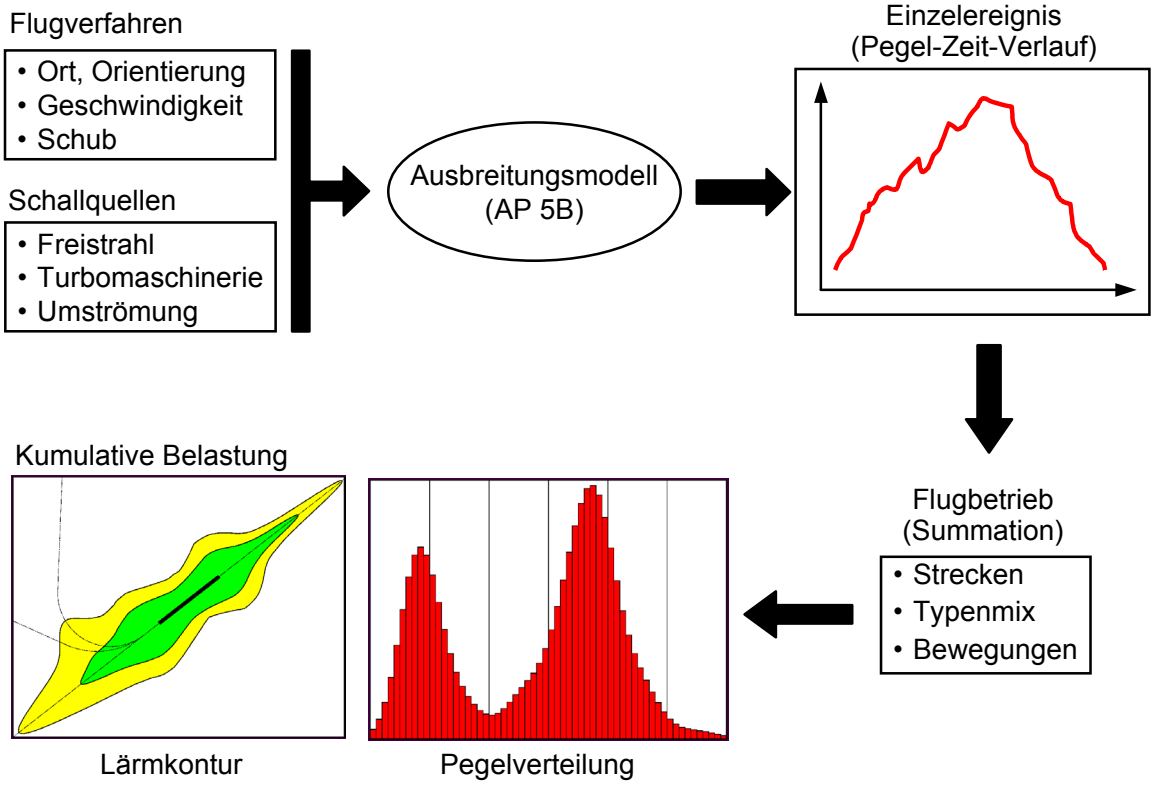


Abbildung 8-1: Schematischer Ablauf einer Fluglärmberechnung mit SIMUL

Der nächste Schritt ist die Transmissionsrechnung, bei der die auf dem Weg zwischen Flugzeug und Immissionsort auftretenden Ausbreitungs- und Laufzeiteffekte berücksichtigt werden. Hier werden – neben den „klassischen“ Effekten wie Dämpfung durch geometrische Ausbreitung und Dissipation – insbesondere die im Arbeitspaket 5B entwickelten Modelle zum Einfluss der Meteorologie mit berücksichtigt. Resultat ist letztendlich ein zeitlicher Schallpegelverlauf für jedes am Immissionsort zu erwartende Einzelschallereignis.

Wird ein komplexer Flugbetrieb zu Grunde gelegt, so werden diese Schritte für jede Kombination von Flugzeugtyp und Flugstrecke wiederholt und die am Immissionsort auftretenden Intensitäten aufsummiert. Letztendlich erhält man so eine Pegel-Häufigkeitsverteilung bzw. einen kumulativen Pegel (z.B. in Form eines Mittelungspegels). Durch ein nachgeschaltetes

Post-Processing können dann auch sog. Lärmkonturen (d.h. Kurven eines konstanten Fluglärmbeurteilungsmaßes) ermittelt werden.

8.3.2. Die Beschreibung der Quelle

Eine vollständige Beschreibung der Abstrahleigenschaften des Flugzeugs ist prinzipiell zwar machbar, erfordert eine entsprechende akustische Vermessung (eine rein analytische Beschreibung der Abstrahleigenschaften auf der Basis von z.B. von Triebwerksparametern und aerodynamischer Konfiguration ist nach derzeitigem Kenntnisstand noch nicht möglich). Eine Vermessung, die die wesentlichen physikalischen Mechanismen mit berücksichtigt, würde eine Variation von Triebwerksleitung, Fluggeschwindigkeit und aerodynamischer Konfiguration über einen weiten Parameterbereich erfordern. Da derartige Messungen sehr personal- und kostenintensiv sind, sind entsprechende Daten in der Regel nicht verfügbar.

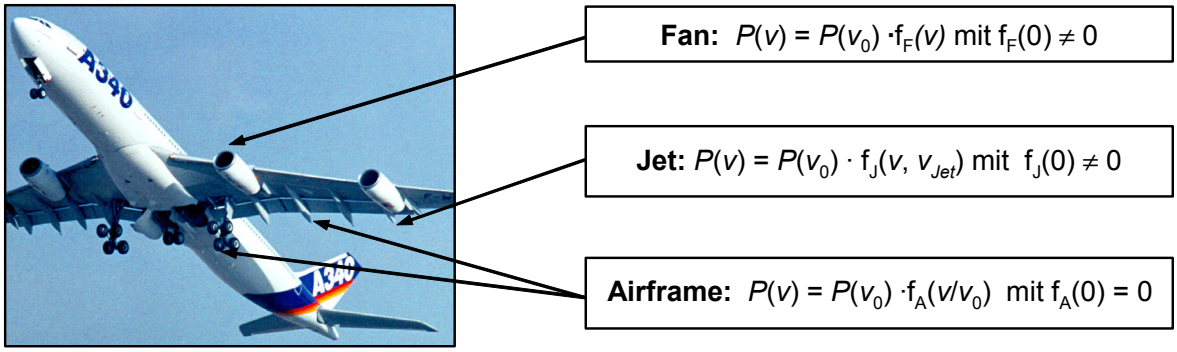


Abbildung 8-2: Prinzip des Teilschallquellenmodells. *P* ist die Schallleistung, v_0 eine Referenzgeschwindigkeit, *v* die Fluggeschwindigkeit und v_{Jet} die Geschwindigkeit des Triebwerksstrahls. Die Funktionen f_F, f_J und f_A beschreiben die Geschwindigkeitsabhängigkeit der jeweiligen Teilschallquelle.

Der im SIMUL-Verfahren verwendete Ansatz [8-11] basiert nun darauf, dass die verschiedenen Schallabstrahlungsmechanismen in unterschiedlicher Weise von der Fluggeschwindigkeit beeinflusst werden (*Teilschallquellenmodell*, s. Abb. 8-2):

- Der durch den Triebwerksstrahl erzeugte Schall *(Jet-Noise)* wird sowohl durch die Fluggeschwindigkeit als auch durch die Geschwindigkeit des Freistrahls beeinflusst. Je höher die Relativgeschwindigkeit zwischen Freistrahl und umgebender Luft ist, um so höher ist die Leistung des abgestrahlten Schalls.
- Für die übrigen im Triebwerk auftretenden Schallentstehungsmechanismen (im folgenden als *Fan-Noise* bezeichnet, da der Triebwerksfan die dominante Quelle ist), äußert sich der Geschwindigkeitseinfluss im wesentlichen als kinematischer Effekt in Form einer Änderung der Abstrahlcharakteristik.
- Der durch Umströmung von Tragflügeln, Zelle und Fahrwerk erzeugte Schall *(Airframe Noise)* hängt ebenfalls nur von der Fluggeschwindigkeit ab. Allerdings ist die Bewegung hier die Ursache der Schallentstehung – im Gegensatz zu den beiden übrigen Komponenten verschwindet der Umströmungslärm im statischen Fall.

Durch diesen Ansatz erfolgt eine Gruppierung von Quellmechanismen auf der Basis einer vergleichbaren Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit. Diese Vorgabe erfordert u.a. die Separierung des Umströmungslärms, da die Geschwindigkeitsabhängigkeit des vom Fahrwerk erzeugten Schalls sich von der des durch die Hochauftriebshilfen erzeugten Schalls unterscheidet.

Allen Teilschallquellen wird jeweils ein charakteristisches Spektrum und eine Richtcharakteristik zugeordnet. Sofern die entsprechenden Beiträge einer Teilschallquelle allerdings akustisch nicht signifikant sind, werden sie nicht ins Modell mit einbezogen. So kann beim Abflug mit hohen Triebwerksleistungen der Umströmungslärm vernachlässigt werden.

Quellseitig erhält man so für eine gegebene Triebwerksleistung F eine Beschreibung der Jet- und Fan-Komponente in Form von Oktav- oder Terzspektren L_n als

$$L_n^{Jet,Fan}(s_0,F,v,\vartheta,\varphi) = L_{0,n}^{Jet,Fan}(F) + \Delta D_n^{Jet,Fan}(\vartheta,\varphi) + \Delta V^{Jet,Fan}(v) \ .$$

Dabei ist s_0 eine Bezugsentfernung von 1 m. Die Korrektur ΔD_n beschreibt die Abstrahlcharakteristik als Funktion der beiden Winkel ϑ (zwischen Ausbreitungsrichtung und Flugzeuglängsachse) und φ (um die Längsachse). Die Korrektur ΔD_n kann auch in Form einer frequenzunabhängigen Korrektur ΔD realisiert werden. ΔV ist eine Geschwindigkeitskorrektur. Sie ergibt sich für die Jet-Komponente als

$$\Delta V^{Jet} = 10 \cdot m(\vartheta) \cdot \lg\left(\frac{v_{Jet} - v}{v_{Jet}}\right) - 10 \cdot \lg(1 - M \cdot \cos\vartheta)$$

mit der Flugmachzahl M, der Freistrahlgeschwindigkeit v_{Jet} und dem sog. *Forward Velocity Index* $m(\vartheta)$. Letzterer hängt von der Bauart des Triebwerks ab. Für die Fan-Komponente ergibt sich die Geschwindigkeitskorrektur als

$$\Delta V^{Fan} = -40 \cdot \lg(1 - M \cdot \cos\vartheta) \ .$$

Für den Umströmungslärm ergeben sich die normierten Spektren als

$$L_n^{Airframe}(s_0,v,\vartheta,\varphi) = L_{0,n}^{Airframe}(v_0) + 10 \cdot a \cdot \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) + \Delta D_n(\vartheta,\varphi)$$

aus einem Referenzspektrum für die Bezugsgeschwindigkeit v_0. Der 2. Term beschreibt eine exponentielle Abhängigkeit der Schalleistung des Umströmungslärms von der Fluggeschwindigkeit. Geht diese gegen Null, so verschwindet der Umströmungslärm (der Pegel geht also gegen $-\infty$). Der Koeffizient a ist dabei abhängig von der Art der Umströmungslärmkomponente (also z.B. Fahrwerk oder Hochauftriebssysteme).

Die Umströmungslärmkomponente ist natürlich unabhängig von der Triebwerksleistung. Sie muss statt dessen für unterschiedliche aerodynamische Konfigurationen (Klappen- und Fahrwerkstellungen) definiert werden.

8.3.3. Modellierung von Ausbreitungseffekten

Aus den im vorangegangenen Abschnitt definierten auf 1 m normierten Spektren ergeben sich dann die entsprechenden Pegel am Immissionsort durch eine spektrale Ausbreitungsrechnung, der folgende Gleichung zu Grunde liegt:

$$L_n(s) = L_n(s_0) - 20 \cdot \lg\left(\frac{s}{s_0}\right) - \alpha_n(s - s_0) - \Delta_n^{AMB}$$

Die einzelnen Korrekturterme haben folgende Bedeutung:

- Der erste frequenzunabhängige Term beschreibt die *geometrische Dämpfung* für die Ausbreitung von Kugelwellen.

- Der zweite Korrekturterm bezieht sich auf die sog. *atmosphärische Dämpfung*. Diese beschreibt Dämpfungseffekte, die durch die Wechselwirkung der Schallwelle mit den Molekülen der Luft hervorgerufen werden. Der frequenzabhängige Dämpfungskoeffizient α_n ist dabei eine Funktion der Lufttemperatur und der relativen Feuchte.
- Der Korrekturterm Δ^{AMB} beschreibt die kumulativen Effekte von Meteorologie (also Wind- und Temperatureinfluss) sowie die Effekte der Wechselwirkung der Schallwelle mit der Erdoberfläche. Diese Korrektur basiert auf dem im Arbeitspaket 5B am Institut für Physik der Atmosphäre erarbeiteten Schallausbreitungsmodell.

Nähere Informationen zur Modellierung dieser Ausbreitungseffekte (physikalische Grundlagen, Umsetzung im Rechenverfahren) können [8-11] entnommen werden.

8.4. Realisierung des Modells als Rechenprogramm

Das SIMUL-Verfahren wurde als Computerprogramm in der Programmiersprache FORTRAN77 umgesetzt [8-12]. Dabei wurde der Schwerpunkt der Anwendung des Programms zunächst auf den Einsatz im wissenschaftlichen Bereich ausgelegt. Spezielle Anwendungen für das Programm sind z.B.:

- Optimierung von lärmarmen An- und Abflugverfahren
- Immissionsberechnungen für spezielle Ausbreitungssituationen
- Untersuchungen zur Optimierung konventioneller Prognoseverfahren

Wesentlicher Hinderungsgrund für einen Einsatz bei der Untersuchung umfangreicher Flugbetriebsfälle ist zunächst noch der Umfang der akustischen Datengrundlage in einem den Möglichkeiten des Programms entsprechenden Umfang. Die Erfassung von akustischen Daten - insbesondere auch im Hinblick auf eine Optimierung des Teilschallquellenmodells - erfolgt im laufenden BMBF-Vorhaben „Lärmarme An- und Abflugverfahren (LANAB)“.

Das Programm SIMUL besteht aus einer Reihe von separaten Modulen, die für die Aufbereitung der Eingabedaten (*Pre-Processsing*), die eigentliche Immissionsberechnung und die nachgeschaltete Weiterverarbeitung (*Post-Processing*) verantwortlich sind. Abbildung 8-3 zeigt den schematischen Ablauf einer Immissionsberechnung mit dem SIMUL-Verfahren:

- Im ersten Schritt erfolgt die Aufbereitung der Eingabedaten (in Abb.8-3 nicht dargestellt). Dies umfasst die Erfassung der rechenfallspezifischen Daten (Flughafen- und Flugstreckengeometrie, Flugbetrieb, topografische und meteorologische Daten). Neben diesen Daten werden für die Berechnung noch die flugzeugtypspezifischen akustischen und Flugleistungsdaten bereitgestellt. Diese müssen dabei an die meteorologischen Parameter (insbesondere Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind) angepasst werden.
- Der nächste Schritt ist die Generierung der Flugbahnen aller am Verkehr teilnehmenden Flugzeugmuster. Dazu werden die Flugleistungsdaten, die Flugstreckenstrukturen sowie die Anzahl der am Verkehr teilnehmenden Flugzeugmuster herangezogen. Hier besteht die Möglichkeit, über definierte Schnittstellen auf externe Flugbahndaten zuzugreifen. Diese Schnittstellen wurden insbesondere im Hinblick auf die im HAP 3 durchgeführten Untersuchungen zu lärmarmen Flugverfahren geschaffen, bei denen Flugtrajektorien aus dem Simulator in das Rechenprogramm eingekoppelt wurden.
- Basierend auf den Flugtrajektorien, den akustischen Basisdaten sowie den topografischen und meteorologischen Daten erfolgt dann eine detaillierte Immissionsberechung für Einzelpunkte (einschließlich der Ausweisung von zeitlichen Schallpegelverläufen) oder aber eine Berechnung von kumulierten Immissionswerten in einem rechtwinkligen Immissionsgitter.

- Durch nachgeschaltete Post-Prozessoren werden die so erhaltenen Immissionsdaten in Form von Grafiken oder Druckausgabe weiterverarbeitet. Hier existieren insbesondere Schnittstellen zu externen Programmen, die auf standardisierte Dateiformaten (DXF, NMGF) zugreifen.

Das Programm ist primär auf den Einsatz im wissenschaftlichen Bereich ausgelegt. Es verfügt daher über eine Reihe von Schaltern und Optionen, die im praktischen Einsatz nicht benötigt werden. Hierunter fallen u.a. verschiedene Modelle zur Berücksichtigung der Effekte bodennaher Schallausbreitung. Außerdem lassen sich einzelne physikalische Mechanismen (von Ausbreitungseffekten bis hin zu flugmechanischen Effekten) gezielt ein- bzw. abschalten. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine Abschätzung der akustischen Signifikanz einzelner Mechanismen im Hinblick auf eine Optimierung konventioneller Rechenmodelle notwendig wird.

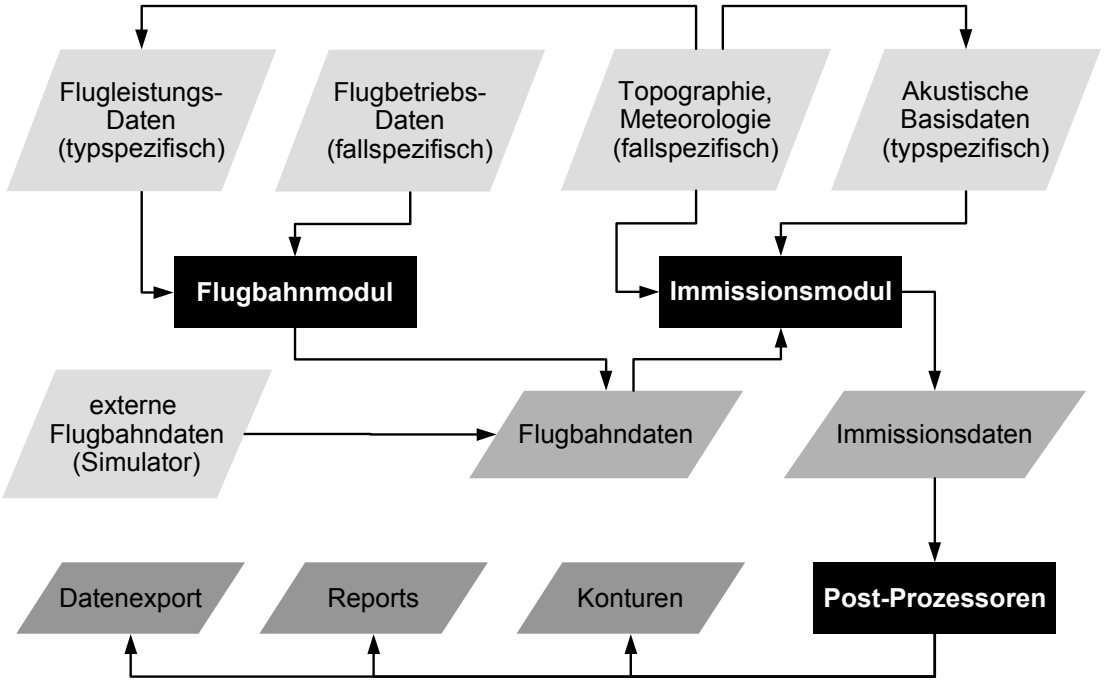


Abbildung 8-3: Schematischer Ablauf einer Immissionsberechnung mit dem SIMUL-Rechenprogrammpaket. Die zur Wartung der Datenbasen und zur Erstellung der Eingabeinformationen notwendigen Prä-Prozessoren sind in dem Schema nicht eingetragen.

Die modulare Struktur und die bestehenden Schnittstellen ermöglichen es, das Kernprogramm zur Immissionsberechung auch als Stand-Alone-Applikation auszukoppeln. Außerdem bietet sie den Vorteil, zur gezielten Untersuchung von zusätzlichen Mechanismen neue Module schnell einzubinden.

8.5. Erste Modellanwendungen

8.5.1. Meteorologische Effekte

Abbildung 8-4 zeigt ein Beispiel für den Einsatz des SIMUL-Programms bei der Untersuchung der Einflüsse meteorologischer Effekte. Die Berechnung wurde für den Abflug eines typischen 2-motorigen Strahlflugzeugs mit einer Abflugmasse von etwa 65 Tonnen durchgeführt.

Zugrunde lag eine in 10 m Höhe gemessene Westwindkomponente von 2 m/s sowie unterschiedliche Temperaturschichtungen:

Stabile Schichtung: Stabile Schichtungen treten in der Regel nachts und bei wenig Wind auf. Darunter fallen insbesondere auch Inversionswetterlagen.

Neutrale Schichtung: Dieser Typ ist der Standardfall. Er tritt in der Regel tagsüber bei bedecktem Himmel auf und ist durch mittlere bis höhere Windgeschwindigkeiten charakterisiert.

Instabile Schichtung: Instabile oder labile Schichtungen ergeben sich tagsüber im Fall von windschwachen Situationen mit wenig Bedeckung (Extremfall: Mittagszeit in den Sommermonaten).

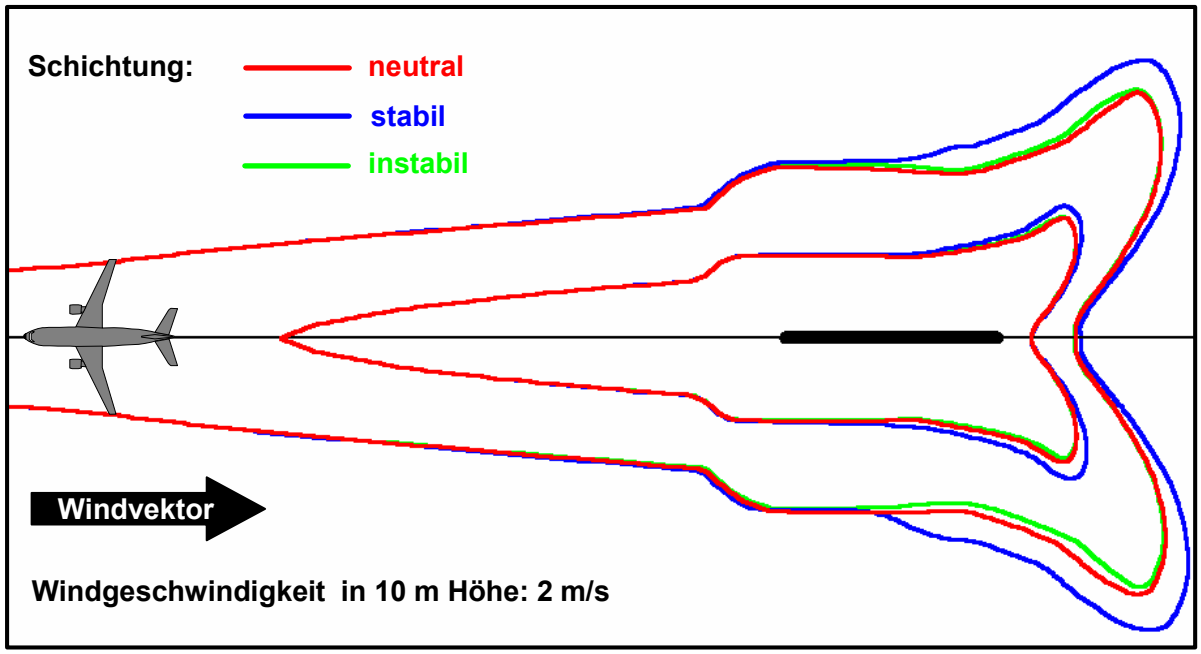


Abbildung 8-4: Einfluss der Temperaturschichtung auf den Maximalschallpegel beim Abflug eines typischen Strahlflugzeugs mit MTOW von ca. 65 t. Dargestellt sind Konturen des A-bewerteten Maximalschallpegels $L_{A,max}$ = 65, 75 dB.

Zunächst einmal erkennt man, dass die Effekte der atmosphärischen Schichtung sich im wesentlichen seitlich und hinter der Startbahn auswirken – in einem Bereich also, in dem das Flugzeug am Boden oder in sehr geringen Höhen operiert. Den stärksten Effekt zeigt die stabile Schichtung. Sie ist charakterisiert durch einen positiven Temperaturgradienten in niedrigen Höhen. Damit verbunden sind Effekte wie Abwärtsbrechung der Schallstrahlung und das Auftreten von Mehrfachreflexionen. Man erkennt, dass die Konturen für die unterschiedlichen Schichtungsvarianten nicht symmetrisch verlaufen. Dies rührt u.a. von der in der Rechnung mit berücksichtigten Winddrehung her.

Abbildung 8-5 zeigt die Ergebnisse einer entsprechenden Modellrechnung zum Einfluss der Windgeschwindigkeit. Bei neutraler Schichtung wurde hier einmal Windstille und einmal eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s (gemessen in 10 m Höhe) zu Grunde gelegt. Bei der Interpretation dieser Darstellung sind zwei Effekte zu unterscheiden:

- Die Unterschiede im Bereich hinter und seitlich der Startbahn resultieren aus dem direkten Einfluss des Windes auf die Schallausbreitung.

- Die sich im Bereich der Spitzen der Konturen unter der Abfluggrundlinie ergebenden Differenzen ergeben sich demgegenüber aus dem Einfluss des Windes auf die Flugbahn: Mit zunehmender Gegenwindkomponente erhöht sich der Auftrieb und damit auch der Steiggradient. Aus der resultierenden Abstandsänderung ergeben sich Verkleinerungen der Konturen im Bereich direkt unter der Flugbahn.

Insgesamt kann man also davon ausgehen, dass die wesentlichen Effekte der Meteorologie sich in den Bereichen ergeben, in denen die Schallausbreitung bodennah erfolgt. Je mehr das Flugzeug an Höhe gewonnen hat, um so stärker dominiert der Einfluss der Meteorologie auf die Flugleistungen die Schallimmission am Boden.

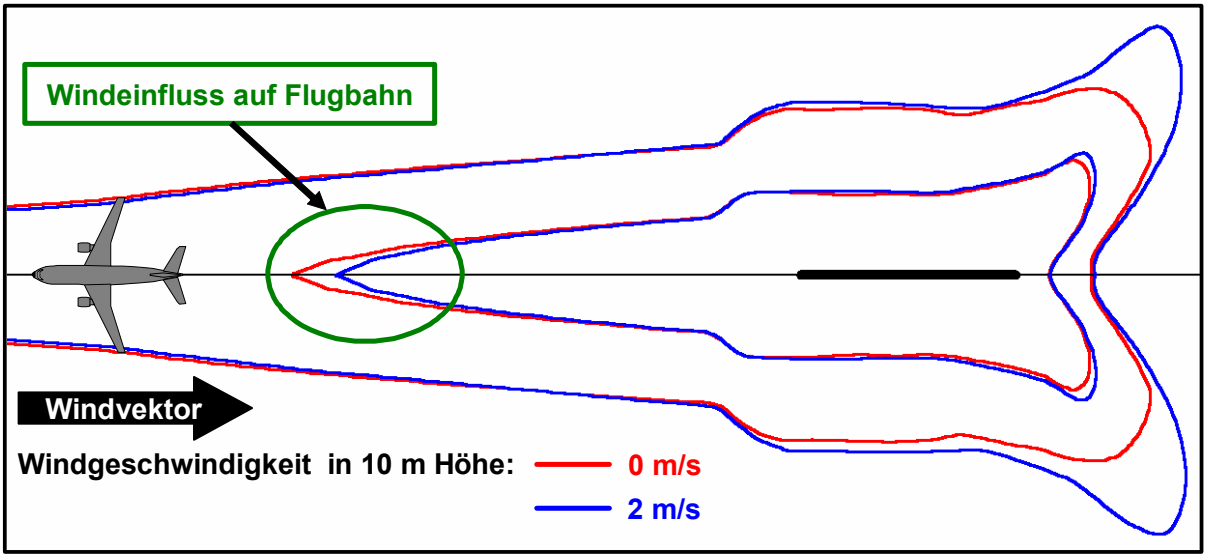


Abbildung 8-5: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Maximalschallpegel beim Abflug eines typischen Strahlflugzeugs mit MTOW von ca. 65 t. Zugrunde liegt neutrale Schichtung. Dargestellt sind Konturen des A-bewerteten Maximalschallpegels $L_{A,max}$ = 65, 75 dB. Im grün markierten Bereich erklärt sich der Unterschied im Kurvenverlauf durch den Windeinfluss auf die Flugbahn.

8.5.2. Modellierung von Anflugverfahren

Im Folgenden sollen einige Beispielrechnungen gezeigt werden, die die Eigenschaften des Teilschallquellenmodells demonstrieren. Hierbei wird ein modellhafter Anflug zu Grunde gelegt, der zwar realitätsnah ist, aber in der Praxis nicht eingesetzt wird. Anmerkungen dazu finden sich am Ende dieses Abschnitts. Als Referenzflugzeug wurde wieder ein typisches 2-motoriges Flugzeug mit einer Landemasse von etwa 60 Tonnen herangezogen.

In den folgenden beiden Abbildungen ist jeweils eine Hälfte einer symmetrischen Lärmkontur dargestellt, die sich für einen Anflug in der Umgebung einer geradlinigen Flugstrecke ergibt. Der Anflug erfolgt von Ost nach West. Dargestellt ist die nördliche Hälfte einer *SEL*-Kontur. Dabei ist aus Darstellungsgründen die vertikale Koordinate stark (um etwa einen Faktor 10) überhöht.

- Die Anflugprozedur beginnt mit einem Horizontalflugteil, bei dem die Triebwerksleistung vergleichsweise hoch ist und damit den Gesamtlärm dominiert.
- Im anschließenden Sinksegment wird die Triebwerksleistung nahezu auf Leerlaufschub zurückgefahren – hier wirken sich auch die Beträge der Umströmung aus. Mit zunehmender Annäherung an den Aufsetzpunkt verbreitert sich die Kontur aufgrund

der abnehmenden Flughöhe. Aufgrund der abnehmenden Geschwindigkeit nimmt dabei der Beitrag des Umströmungslärms ab.

- In etwa 15 km Abstand werden die Klappen ausgefahren (hier willkürlich als Stellung „A“ bezeichnet). Dadurch erhöht sich der Umströmungslärm.
- Im Bereich von etwa 8 km werden dann die Klappen in die nächsthöhere Stellung „B“ gesetzt und das Fahrwerk wird ausgefahren. Aufgrund der damit verbundenen Widerstandserhöhung wird das Triebwerk bis zu einer Leistung hochgefahren, dass der Triebwerkslärm den Gesamtlärm bestimmt. Würde man die Triebwerkslärmkomponente separat auftragen, so würde der Verlauf der Kontur nahezu identisch mit dem Verlauf der Kontur für den kombinierten Triebwerks- und Fahrwerkslärm sein.

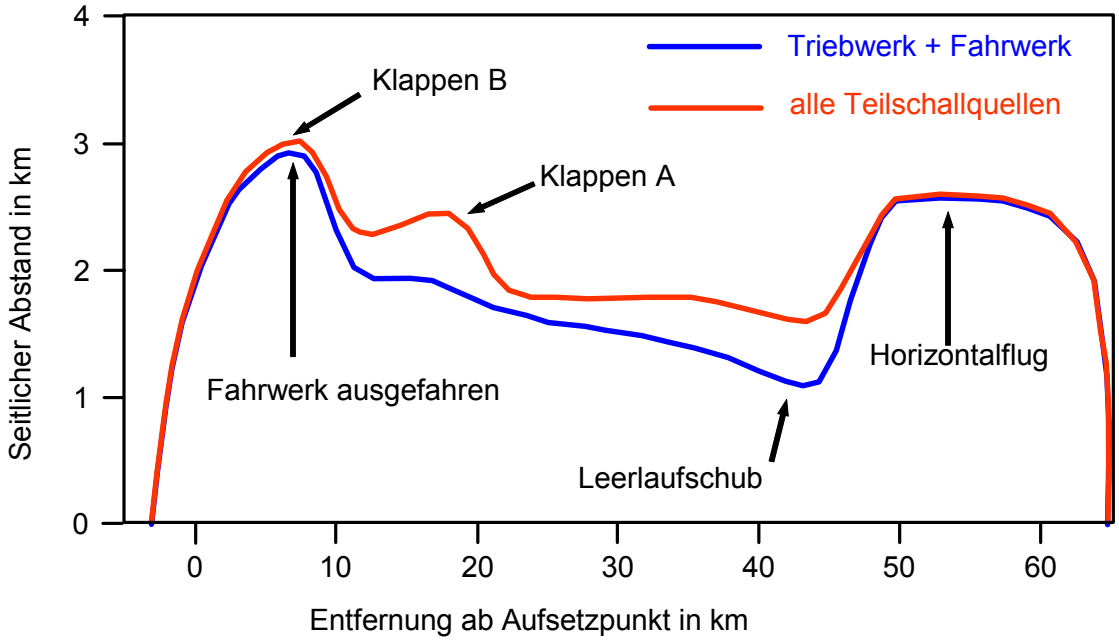


Abbildung 8-6: SEL-Kontur für einen modellhaften Anflug (nur obere Hälfte der Kontur in stark überhöhter Darstellung). Eingetragen sind die Beiträge aller Teilschallquellen sowie nur diejenigen von Triebwerk und Fahrwerk.

Dieses Rechenbeispiel zeigt, dass bei dem untersuchten Flugzeugmuster und dem gewählten Anflugverfahren Umströmungslärm im Flughafennahbereich noch keine Rolle spielt, da hier der Triebwerkslärm weitestgehend dominiert. Dies kann sich aber ändern, wenn durch neuere Technologien leisere Triebwerke entwickelt werden. In diesem Fall sollte bekannt sein, welche Beiträge vom Umströmungslärm zu erwarten sind – d.h. wann dieser Effekt beginnt, eine maßgebliche Rolle zu spielen.

Aus diesem Grund wurde die gleiche Anflugprozedur noch einmal durchgerechnet, wobei allerdings die Triebwerksleistung konstant gehalten wurde (und zwar nahezu bei Leerlaufschub). Eine derartige Prozedur ist in Realität zwar nicht fliegbar, kann aber im Rechner ohne weiteres simuliert werden. Ziel dieser Rechnung war es, die Beiträge der einzelnen Teilschallquellen besser identifizieren zu können. Das Ergebnis ist in Abbildung 8-7 dargestellt.

- Die Kontur für die Triebwerkskomponente verläuft im Horizontalflugteil parallel zur Anfluggrundlinie (die durch die horizontale Achse repräsentiert wird). Anschließend verbreitert sich diese Kontur aufgrund der abnehmenden Flughöhe.

- Die Kontur für alle Teilschallquellen nimmt bis zum Ausfahren der Klappen weniger stark zu als diejenige für die Triebwerkskomponente, da aufgrund der Verzögerung der Umströmungslärm abnimmt.
- Das Ausfahren der Klappen ist deutlich erkennbar. Allerdings ist der Effekt des Ausfahrens in die höhere Klappenstellung nicht mit einer deutlichen Erhöhung des Umströmungslärms verbunden, weil hier die Geschwindigkeit durch das Ausfahren der Klappen in Stellung „A“ schon reduziert wurde.
- Das Ausfahren des Fahrwerks ist hier deutlich zu erkennen. Allerdings ist der Effekt im dargestellten Fall noch vergleichsweise gering.

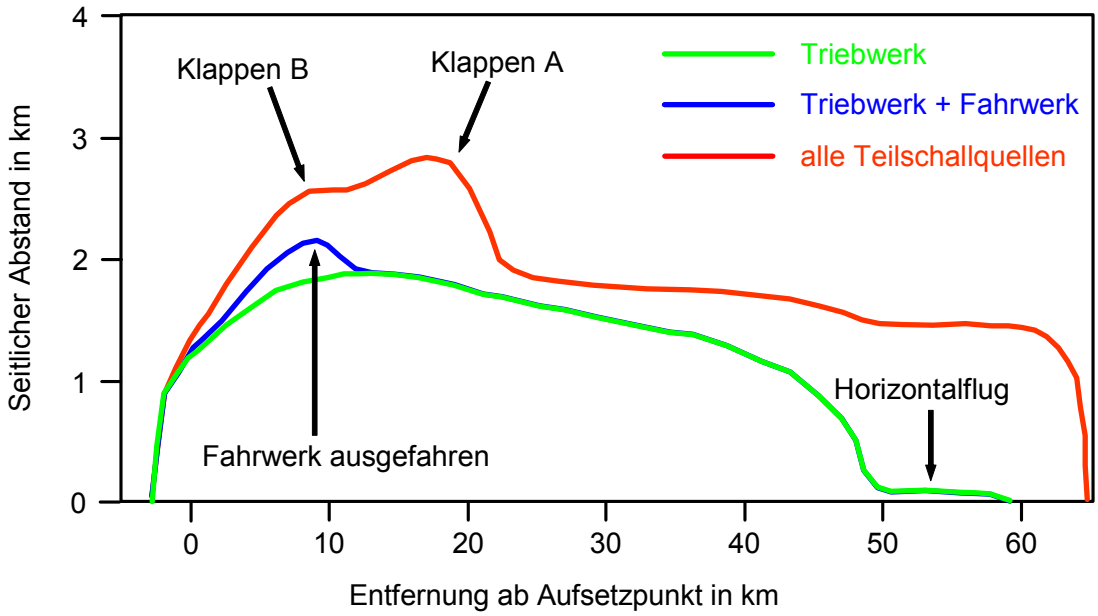


Abbildung 8-7: SEL-Kontur für einen modellhaften Anflug mit konstanter Triebwerksleistung (nur obere Hälfte der Kontur in stark überhöhter Darstellung). Eingetragen sind die Beiträge verschiedener Teilschallquellen. Geschwindigkeits- und Konfigurationsänderungen wie bei der Anflugprozedur in Abbildung 8-6.

Anmerkungen zum vorgestellten Beispiel:

Das dargestellte Beispiel ist rein exemplarischer Natur und soll nur die *Möglichkeiten des Rechenverfahrens* aufzeigen. Grund dafür ist, dass die zu Grunde gelegten Quellendaten für den Umströmungslärm noch nicht ausreichend belastbar sind: Im Rahmen der im Projekt durchgeführten Überflugversuche ergab sich versuchsbedingt nur eine vergleichbar geringe Datenmenge die zur Modellbildung für den Umströmungslärm herangezogen werden konnte. Insofern sind die Darstellungen 8-6 und 8-7 primär qualitativer Natur – sie dienen also eher zur Verdeutlichung von Effekten.

Das Beispiel zeigt aber, das mit Hilfe eines Simulationsverfahrens auf Teilschallquellenbasis gezielt einzelne Effekte analysiert werden können, was letztendlich zu einer Optimierung von Flugverfahren herangezogen werden kann. Hier sind vor allem Anflugverfahren von Interesse – bei Abflügen dominiert weiterhin der Triebwerkslärm, so dass eine Optimierung der Verfahren hier auch mit einfacheren Rechenmodellen erfolgen kann.

In diese Richtung zielt auch das vom BMBF geförderten Vorhaben „Lärmarme An- und Abflugverfahren (LANAB)“. Hier wird das SIMUL-Verfahren eingesetzt und auch hinsichtlich einer Verbesserung der Quellmodelle weiterentwickelt. Insbesondere sollen hier weiterge-

hende Daten zum Umströmungslärm im Rahmen von umfangreichen Überflugversuchen ermittelt werden, so dass eine belastbare Validierung des Rechenverfahrens möglich wird.

8.6. Die Überarbeitung von ECAC Doc.29

Schon bei der Definition des Projekts war abzusehen, dass ein Fluglärmberechnungsverfahren auf der Basis einer Einzelflugsimulation zur Zeit aufgrund der Verfügbarkeit der Eingabedaten noch kein weitestgehend in die Praxis umsetzbares Konzept ist. Der Einsatz eines derartigen Verfahrens ist zunächst auf die im Abschnitt 8.4 aufgezeigten Anwendungsbereiche fokussiert.

Eine erweiterte Zielsetzung des Projekts war es daher, Anforderungen und Spezifikationen an ein gesetzlich festschreibbares Verfahren zu definieren. Dieses Ziel wurde insbesondere in Anbetracht der anstehenden Novellierung des Fluglärmgesetzes anvisiert.

Die Aktivitäten der EU zu einer harmonisierten Lärmschutzpolitik in Europa [8-2,-3] und die damit verbundene Notwendigkeit von vereinheitlichten Berechnungsverfahren legten es aber dann nahe, sich mit dieser Zielsetzung an den europäischen und internationalen Aktivitäten zu orientieren. Aus diesem Grunde wurden die Aktivitäten zur Definition eines festschreibbaren Verfahrens in die Arbeiten der ECAC-Arbeitsgruppe AIRMOD mit einbezogen, die sich mit der Überarbeitung des ECAC-Dokuments Doc.29 aus dem Jahr 1997 [8-7] als ein mögliches harmonisiertes Berechnungsverfahren befasst.

Diese Überarbeitung wird im Jahr 2004 abgeschlossen sein. Das überarbeitete Dokument Doc.29R wird den derzeitigen, in der Praxis bewährten Kenntnisstand (*Current Best Practice*) widerspiegeln. Das war auch die Zielsetzung von AIRMOD – es sollten nur in der Praxis bewährte Ansätze und Modelle einfließen.

Wesentliche Änderungen gegenüber der 2. Auflage des Dokuments aus dem Jahr 1997 sind:

- Einführung eines separaten *„Applications Guide“*, der sowohl dem Anwender als auch dem Endnutzer eines Berechnungsverfahrens Unterstützung bei der Durchführung von Fluglärmuntersuchungen bietet.
- Implementierung eines Segmentierungsalgorithmus der sich am aktuellen Stand dieser Modellierungstechnik orientiert.
- Überarbeitung der Algorithmen zur Zusatzdämpfung bei bodennaher Schallausbreitung in enger Kooperation mit den internationalen Aktivitäten zu diesem Thema.
- Verbesserte Verfahren zur Flugprofilmodellierung
- Bereitstellung einer harmonisierten Datengrundlage auf internationaler Ebene, die durch Eurocontrol und die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA gewartet wird. Diese Datengrundlage wird im WWW verfügbar sein.

Außerdem erfolgte eine Anpassung und Erweiterung der bereits im ursprünglichen Doc.29 beschriebenen Formalismen entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand. Dadurch bietet Doc.29R eine weitestgehende Flexibilität und deckt die Anforderungen an die typischen Anwendungsgebiete eines Fluglärmberechnungsverfahrens ab.

8.7. Zusammenfassung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die anvisierten Zielsetzungen mit einer Ausnahme vollständig erfüllt wurden. Was im Rahmen des Projekts nicht durchführbar war, war eine ausreichende Bereitstellung und Validierung von Daten zur Quellmodellierung. Dies wird allerdings im laufenden BMBF-Projekt LANAB erfolgen.

Im einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Es wurde ein Simulationsmodell auf Teilschallquellenbasis erarbeitet, dass zur Berechnung der Belastung durch Fluglärm herangezogen werden kann. Der Anwendungsbereich dieses Modells ist primär an speziellen Problemstellungen (Optimierung von Flugverfahren, Einzelfalluntersuchungen) orientiert.
- In dieses Rechenverfahren wurde das im Arbeitspaket 5B entwickelte fortschrittliche Schallausbreitungsmodell integriert. Die Realisierung dieses Modells erfolgte im übrigen in einer Form, die auch eine Integration in konventionelle Rechenmodelle ermöglicht.
- Im Rahmen der Aktivitäten der ECAC-Arbeitsgruppe AIRMOD wurde sich an der Entwicklung eines festschreibbaren Fluglärmberechnungsverfahrens beteiligt, dass den aktuellen praktikablen Kenntnisstand repräsentiert und einen potentiellen Kandidaten für ein harmonisiertes europäisches Berechnungsverfahren darstellt.

8.8. Schrifttum

[8-1] Isermann U.: *Berechnung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Verkehrsflughäfen mit Hilfe eines Simulationsverfahrens.* MPI für Strömungsforschung, Bericht 7/1988, Feb. 1988 (Dissertation).

[8-2] Kommission der europäischen Gemeinschaften: *Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.* Luxemburg, 25. Juni 2002. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L189/12 vom 18.7.2002.

[8-3] Kommission der europäischen Gemeinschaften: *Empfehlung der Kommission vom 6. August 2003 über Leitlinien für die geänderten vorläufigen Berechnungsmethoden für Industrie-, Flug-, Straßenverkehrs- und Eisenbahnlärm und diesbezügliche Emissionsdaten.* Brüssel, 6. August 2003. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L212/49 vom 22.8.2003.

[8-4] Isermann, U., Schmid, R.: *Bewertung und Berechnung von Fluglärm.* Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, FB L-2/96-50144/96, Göttingen, Juli 1997.

[8-5] Der Bundesminister des Innern: *Bekanntmachung der Datenerfassungssysteme für die Ermittlung von Lärmschutzbereichen an zivilen (DES) und militärischen Flugplätzen (DES-MIL) sowie einer Anleitung zur Berechnung (AzB).* Gem. Ministerialblatt 26, Ausgabe A, Nr. 8,126-227, Bonn, 10. März 1975.

[8-6] Gulding., J.M.; Olmstead, J.R; Fleming, G.C: *Integrated Noise Model (INM) Version 6.0 User´s Guide.* Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Report No. FAA-AEE-99-03, September 1999.

[8-7] European Civil Aviation Conference (ECAC): *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports.* ECAC.CEAC Doc.29, 1st Edition, 1986 (2nd Edition 1997).

[8-8] European Civil Aviation Conference (ECAC): *Methodology for Computing Noise Contours around Civil Airports.* ECAC.CEAC Doc.29R, Vol.1: „Applications Guide“, Vol.2 „Technical Guide“. Proposal by AIRMOD Technical Subgroup, Draft Version (wird 2004 veröffentlicht).

[8-9] Isermann, U., Schmid, R.: *Untersuchungen mit dem Integrated Noise Model.* Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, FB L-1/95-50135/95, Göttingen, Oktober 1996.

[8-10] Thomann, G.; Bütikofer, R.; Krebs, W*.: FLULA2 – Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation.* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Bericht EMPA 840´143/513.1933, Dübendorf, Oktober 2001.

[8-11] Boguhn, O., Henkel, C. Isermann, U.: *Rechenprogramm SIMUL - Technisches Handbuch.* Version 1., DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen (in Vorbereitung).

[8-12] Henkel, C. Isermann, U.: *Rechenprogramm SIMUL - Benutzerhandbuch und Befehlsreferenz.* Version 1., DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen Februar 2004.

9. Schallausbreitungsmodelle

Arbeitspaket 5B: ***Dr. Dietrich Heimann, E-Mail:*** d.heimann@dlr.de
DLR-Institut für Physik der Atmosphäre,
Abteilung Dynamik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen

9.1. Forschungsziel

Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung und Erstellung eines Modellsystems zur konsistenten Simulation der meteorologischen und topografischen Einflüsse auf die Schallausbreitung.

Das Modellsystem, das aus der Kopplung eines existenten meteorologischen Modells und eines hier zu entwickelnden akustischen Modells besteht, soll schließlich in ein Lärmprognoseverfahren einfließen. Dieses kann für Planungszwecke, Sonderfalluntersuchungen (z.B. „worst case“ Betrachtungen) und zur Ermittlung lärmarmer Flugrouten verwendet werden.

Das akustische Modell muss zwei Ansprüchen genügen:

- Es muss die Physik der Schallausbreitung möglichst richtig beschreiben und
- es muss so ökonomisch sein, dass es praxistauglich ist.

Zur Erreichung des Ziels wird die Modellentwicklung in abgestufter Komplexität durchgeführt. Dabei werden mit einem physikalisch umfangreichen Modell akustische Einzelprozesse (Reflexion, Refraktion, Diffraktion, Streuung, Absorption) simuliert und Parametrisierungsansätze getestet, die in ein vereinfachtes Modell einfließen, das in ein praxistaugliches Prognosemodell (geeignet für Langzeitprognosen auf der Basis von komplexen Flugbetriebsszenarien) eingearbeitet werden kann.

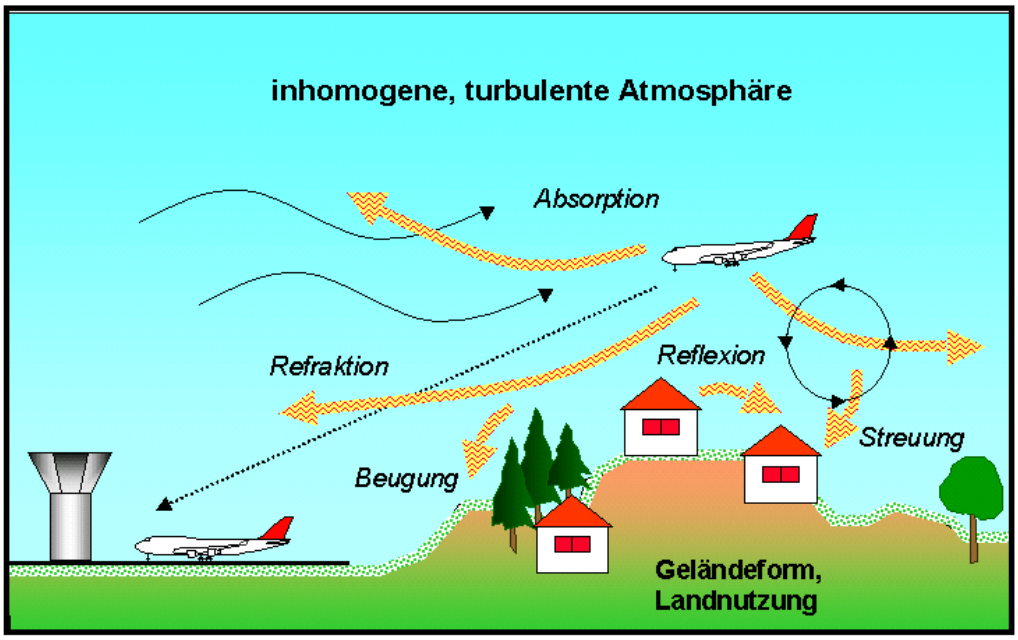


Abbildung 9-1: Schematische Darstellung der für die Schallausbreitung in der Atmosphäre maßgeblichen Prozesse.

9.2. Arbeitskonzept

Die Berechnung der Ausbreitung von Schallwellen in einer inhomogenen, von der Topografie beeinflussten Atmosphäre ist immer noch eine große Herausforderung. Die Leistungsfähigkeit moderner Computer stellt dabei den begrenzenden Faktor dar. Im Bereich der ingenieurmäßigen Lärmprognose werden Verfahren verwendet, die die meteorologischen und topografischen Einflüssen oft nur pauschal und in stark vereinfachter Form beschreiben. Im Bereich der akustischen Forschung werden verschiedene Ansätze verfolgt, die zumeist auf Approximationen der Helmholtz-Gleichung beruhen. Aber auch diese Modelle unterliegen in Hinblick auf die Berücksichtigung relevanter Prozesse oder bezüglich der Geometrie (z.B. Radialsymmetrie) z.T. erheblichen Einschränkungen.

Ein viel versprechendes Verfahren besteht dagegen in der Zeitintegration der Eulergleichungen, die eine prognostische Bestimmung des Schalldrucks und der Schallschnelle ermöglichen. Die Eulergleichungen lassen sich bezüglich eines beliebigen meteorologischen Zustands linearisieren, sodass die Ausbreitung von Schallwellen entsprechend der linearen Wellentheorie ohne weitere Einschränkungen dreidimensional simuliert werden kann. Allerdings benötigen Modelle, die auf der linearisierten Eulergleichung beruhen, heutzutage noch sehr viel Rechenzeit und Speicherplatz, sodass ihre Anwendungen weniger bezüglich der Prozesse und der Geometrie, sondern eher durch die Anzahl der maximalen Gitterpunkte und damit bezüglich Wellenlänge und Ausbreitungsentfernung beschränkt sind.

Im Rahmen des Projekts Leiser Flugverkehr wurde daher von Beginn an zweigleisig gefahren. Einerseits sollte ein physikalisch umfassendes Schallausbreitungsmodell entwickelt werden, das den Komplex „Topografie-Meteorologie-Akustik“ in konsistenter Weise simulieren kann, andererseits sollte aber auch den Anforderungen der Praxis dadurch Rechnung getragen werden, dass ein vereinfachtes Verfahren entwickelt wird, das gegenüber den heute üblichen ingenieurmäßigen Verfahren einen Fortschritt aufweist, gleichzeitig aber handhabbar bleibt und auf alle fluglärmrelevanten Situationen angewandt werden kann.

9.3. Das linearisierte Eulermodell AKU3D

Das linearisierte Eulermodell basiert auf den prognostischen Gleichungen für den Schallschnellevektor $\mathbf{U}''$ und den Schalldruck p'', die gegenüber einem vorgegebenen inhomogenen meteorologischen Grundzustand (Windvektor $\mathbf{U}_{met}$, Druck p_{met} und spezifisches Volumen α_{met}) linearisiert sind:

$$\frac{\partial \mathbf{U}''}{\partial t} = -(\mathbf{U}_{met} \cdot \nabla)\mathbf{U}'' - (\mathbf{U}'' \cdot \nabla)\mathbf{U}_{met} - \alpha_{met}\nabla p'' - \alpha'' \nabla p_{met}$$

$$\frac{\partial p''}{\partial t} = -\mathbf{U}_{met}\nabla p'' - \mathbf{U}'' \cdot \nabla p_{met} - \kappa\, p_{met}\, \nabla \cdot \mathbf{U}'' - \kappa\, p'' \nabla \cdot \mathbf{U}_{met}$$

Die Gleichungen werden numerisch in der Zeit t integriert. Während einer Simulation werden an der Quelle Druckwellen angeregt, die sich dann in alle Richtungen ausbreiten. Die Zeitintegration erfolgt solange, bis die wesentlichen Wellen das Modellgebiet durchwandert haben. Die örtliche Amplitude dieser Wellen wird registriert und in Schalldruckpegel umgerechnet. Am Boden und an Hindernissen werden die Wellen reflektiert. Die Simulation des Einflusses von schallweichem Boden erfordert die explizite Darstellung einer Bodenschicht mit Dämpfungseigenschaften. An den übrigen Rändern des Modellgebiets verhindern entsprechende Randbedingungen und eine zusätzliche Dämpfungsschicht unerwünschte Reflexionen.

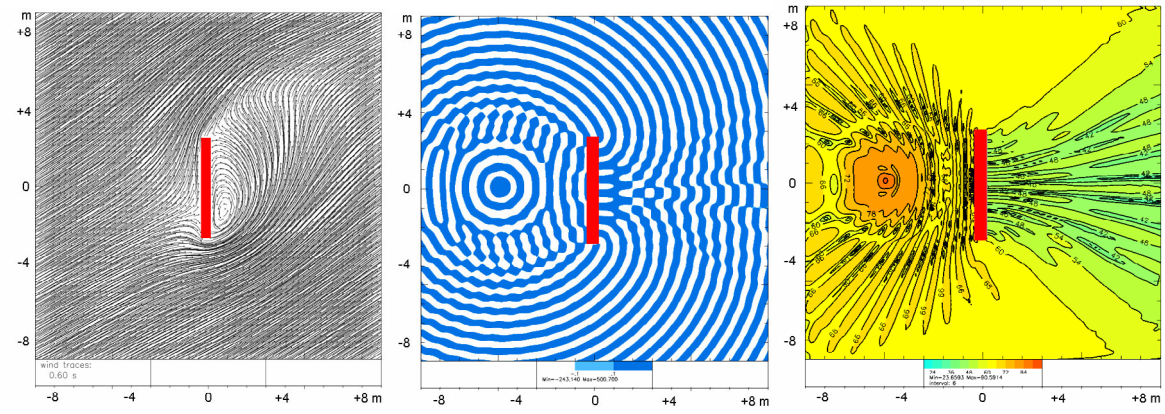


Abbildung 9-2: Horizontalschnitte durch ein berechnetes Windfeld (links), das Momentbild des akustischen Wellenmusters (mittig) und der dazugehörige Schalldruckpegel.

Das Modell AKU3D kann die benötigten meteorologischen Felder von einem vorlaufenden Strömungsmodell übernehmen und eine zu diesen Feldern konsistente Ausbreitung simulieren. Die Abbildung 9-2 zeigt als Beispiel ein durch eine 5 m lange und 2,5 m hohe Wand (rot) gestörtes Windfeld bei Schräganströmung (links). Die Schallwellen (mittig), die von einer 5 m vor der Wand und 0,5 m über dem Boden befindlichen Schallquelle mit einer Frequenz von 500 Hz ausgestrahlt werden, werden an der Wand und am Boden reflektiert. Hinter die Wand gelangen sie durch Beugung (Diffraktion). Der erhöhte Windgradient über und neben der Wand führt zusätzlich zu einer Brechung (Refraktion) in den abgeschatteten Bereich hinter der Wand. Der sich ergebende Schalldruckpegel (rechts) wird durch die Interferenzmuster im tonalen Schallfeld geprägt. Die Asymmetrie ergibt sich aus der Schräganströmung.

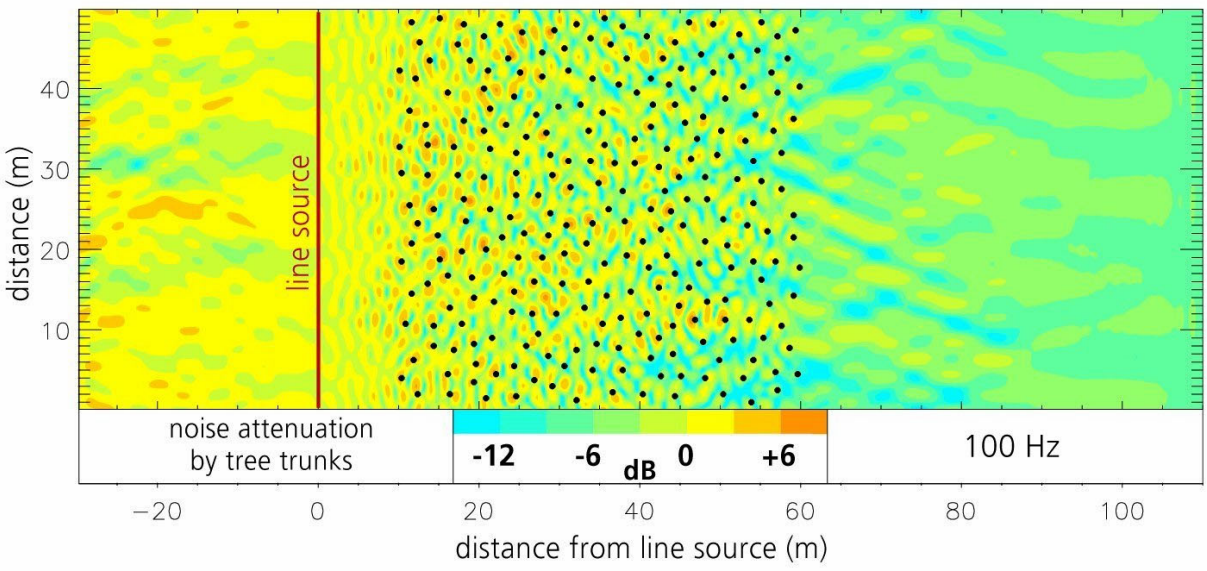


Abbildung 9-3: Berechnete Schalldämpfung (grün/blau=leiser, gelb/rot=lauter) durch einen 50 m breiten Streifen zufällig verteilter 20 m hoher und 50 cm dicker Baumstämme auf die Schallausbreitung ausgehend von einer bodennahen Linienquelle (100 Hz).

Das linearisierte Eulermodell AKU3D wurde bisher vor allem auf Prinzipstudien der Schallausbreitung im Freien angewandt, so zum Beispiel auf den Einfluss von Schallschutzwänden unterschiedlicher Bauart bei Überströmung und bei Turbulenz, den Einfluss unter-

schiedlicher Berücksichtigung der meteorologischen Felder, den Einfluss von Häusern und Dachformen auf den Schalleintrag in die lärmabgewandten Fassaden mit und ohne Überströmung, und den Einfluss eines idealisierten Waldstreifens auf die Schallausbreitung, ebenfalls mit und ohne Überströmung. Das letzte Beispiel ist in der Abb. 9-3 visualisiert.

9.4. Das vereinfachte Schallausbreitungsmodell AKUFIX

9.4.1. Prinzip

Für die Integration in das Lärmprogoseverfahren (Arbeitspaket 5A) wird ein vereinfachtes Modell (AKUFIX) herangezogen, dass auf dem Lagrange'schen Schallpartikelmodell AKUMET[3] beruht. Mit diesem Ausbreitungsmodell wird die Schalldämpfung durch den Boden und die Meteorologie für eine Vielzahl von Situationen vorausberechnet und in Korrekturtabellen abgelegt.

Es wird davon ausgegangen, dass sich der Oktavband-Schallpegel L in Bodennähe auf Grund der Schallemission eines sich in der Luft befindlichen Flugzeugs wie folgt zusammensetzt:

$$L = L_W + D_C - A_{div} - A_{MB} - A_{atm}$$

Hier ist:

L_W	Schallleistungspegel
D_C	Richtwirkungskorrektur
A_{div}	Schalldämpfung auf Grund der kugelförmigen Schallausbreitung von einer Punktschallquelle im Freifeld (geometrische Ausbreitung)
A_{MB}	Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse
A_{atm}	Luftabsorption

Der Beitrag des Arbeitspakets 5B bezieht sich auf die Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse, d.h. auf die Bestimmung von A_{MB}.

9.4.2. Berechnung von Δ_{MB}

Die Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse fasst folgende Prozesse zusammen:

a) Reflektion über schallweichem Boden

b) Refraktion auf Grund vertikaler Gradienten von Wind und Temperatur

c) Mehrfachreflektion am Boden bei Abwärtsbrechung

d) Diffraktion in Schattenzonen bei Aufwärtsbrechung (creeping wave)

e) Streuung auf Grund von Turbulenz

Es gelten folgende Voraussetzungen:

a) Der Boden ist eben und rau.

b) Der Boden hat eine einheitliche Rauigkeit und ist bezüglich seiner aerodynamischen Eigenschaften homogen

[3] Heimann D., Groß G., 1999: Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley. Applied Acoustics, 56, 73-100.

c) Der Boden hat einen einheitlichen Strömungswiderstand und ist bezüglich seiner akustischen Eigenschaften (Impedanz) homogen

d) Die Atmosphäre ist horizontal homogen.

e) Die Schallquelle ist inkohärent.

Die Schallpartikel („Phonone“) werden ausgehend von der Quellposition (gegeben durch die Höhe *h* des Flugzeugs über Grund) in den maßgeblichen Teilraum abgestrahlt. Die Anfangsrichtung der Partikel ist gegeben durch den Azimutwinkel α (0° = gegen den Wind; 180° = mit dem Wind) und Elevationswinkel γ (-90° = senkrecht nach unten, 0° = horizontal). Der maßgebliche Teilraum wird so gewählt, dass die Strahlen unter Berücksichtigung ihrer allfälligen Krümmung das maßgebliche Empfängergebiet erreichen. Das maßgebliche Empfängergebiet ist ein kreisförmiges Volumen mit einem Radius *R* und der vertikalen Mächtigkeit Δz, das auf dem Boden aufliegt. Der Fußpunkt des Flugzeugs definiert den Mittelpunkt des Empfängergebiets. Im weiteren Verlauf folgen die Schallpartikel den Schallstrahlen.

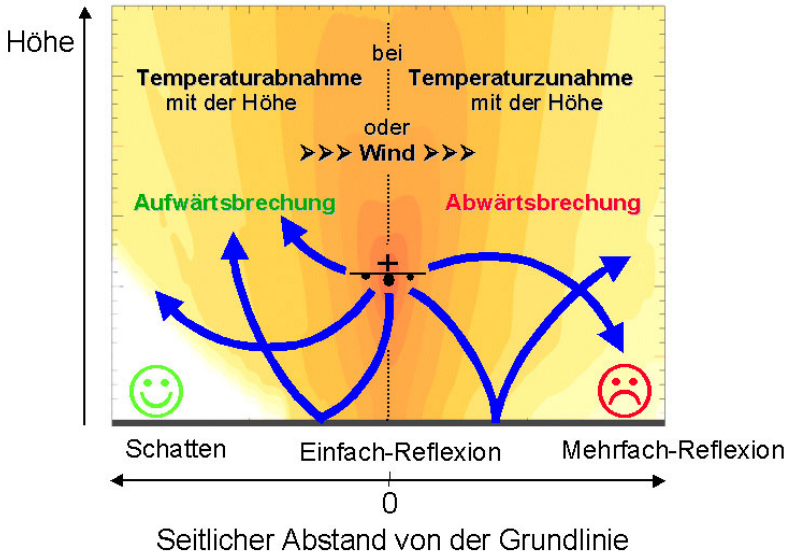


Abbildung 9-4: Schematische Darstellung der Wirkung von vertikalen Wind- und Temperaturgradienten auf die Brechung (Refraktion) von Schallwellen. Aufwärtsbrechung (linke Bildhälfte) führt zur Bildung von akustischen Schatten, Abwärtsbrechung dagegen ggf. zu Mehrfachreflexionen.

9.4.2.1. Refraktion

Die Position eines Schallpartikels entlang eines Schallstrahls wird mittels Zeitintegration der folgenden Gleichungen berechnet (Schallstrahlen nach Pierce):

$$\frac{dx}{dt} = u + c_{met} n_x \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = v + c_{met} n_y \quad ; \quad \frac{dz}{dt} = c_{met} n_z$$

$$\frac{dn_x}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{dn_y}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{dn_z}{dt} = -\frac{\partial c_{met}}{\partial z} - n_x \frac{\partial u_{met}}{\partial z} - n_y \frac{\partial v_{met}}{\partial z}$$

Hier ist $c = \sqrt{\kappa R_L T(z)}$ die adiabatische Schallgeschwindigkeit, $u_{met}(z)$, $v_{met}(z)$ die horizontalen Windkomponenten und n_x, n_y, n_z die Komponenten des Wellenvektors. *x, y, z* sind die Koordinaten, die in ihrer zeitlichen Abfolge die Lage des Schallstrahls im Raum definieren. Die Flugzeugposition entspricht $x = 0$, $y = 0$, $z = h$,. Die Krümmung des Schallstrahls be-

schreibt die Refraktion (Brechung) auf Grund der vertikalen Gradienten des Windes und der von der Temperatur abhängigen Schallgeschwindigkeit c_{met} (siehe Abb. 9-4).

9.4.2.2. Reflektion

Trifft ein Schallstrahl auf den Boden, so wird er dort entsprechend dem Gesetz „Ausfallwinkel = Einfallswinkel“ reflektiert. Ist der Boden schallweich, so verliert das Schallpartikel einen Teil seiner Energie. Dabei wird die Schallimpedanz des Bodens und der Einfallwinkel φ berücksichtigt. Die komplexe spezifische Impedanz des Bodens wird nach Delany und Bazley empirisch aus dem Strömungswiderstand σ des Bodens in Abhängigkeit von der Frequenz *f* bestimmt.

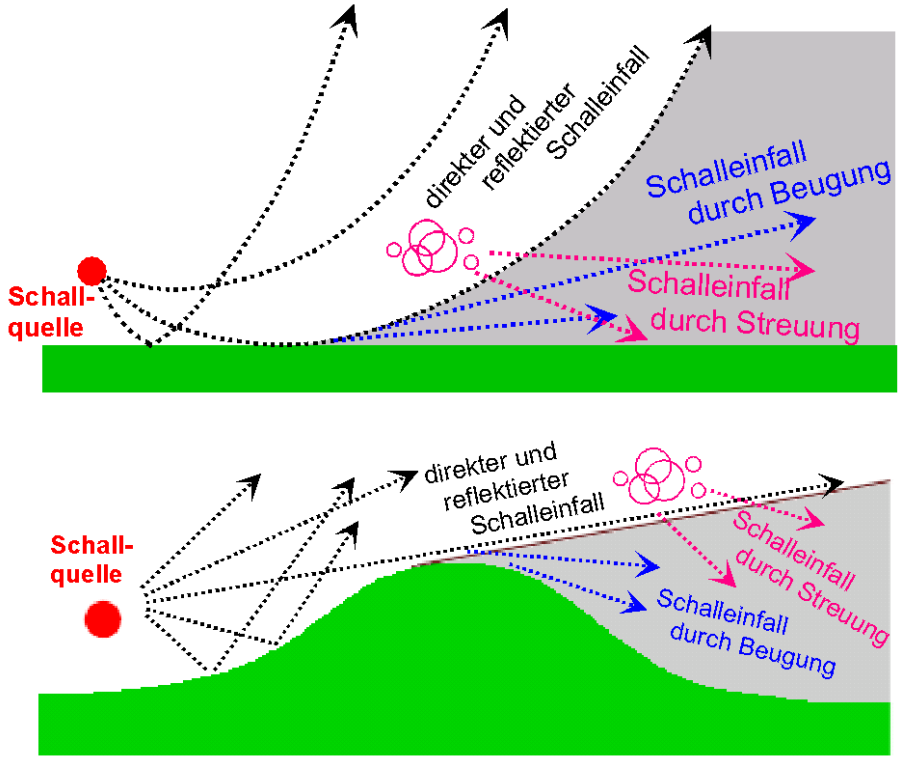


Abbildung 9-5: Schematische Darstellung der Wirkung von Beugung (Diffraktion) und Streuung auf den Schalleintrag in akustische Schatten.

9.4.2.3. Diffraktion

In refraktionsbedingten akustischen Schatten wird das Prinzip der ‚creeping wave‘ verfolgt. Die Schallpartikel bewegen sich entlang des Bodens und verlieren dabei rasch an Energie. Der Energieverlust ergibt sich geometrisch aus dem Zuwachs der Querschnittfläche zwischen zwei gekrümmten Strahlen relativ zum Zuwachs der Querschnittfläche zwischen Boden und gekrümmten Strahl. Bei der Berechnung der Strahlkrümmung wird der numerische Zeitschritt frequenzabhängig gewählt. Dadurch erhält man für kurze Wellen (hohe Frequenz) eine stärkere Krümmung und somit einen höheren Energieverlust als für lange Wellen (niedrige Frequenz). Aus dem Verhältnis der Flächenzuwächse ergibt sich ein Diffraktionskoeffizient, der vom Azimutwinkel und der Frequenz abhängt.

9.4.2.4. Streuung

Es wird angenommen, dass Streuung an Turbulenz den Schallenergieverlust innerhalb von Schattenzonen begrenzt. Die Literaturwerte schwanken dabei zwischen 20 und 40 dB. Als konservativer Wert wird hier eine Deckelung des Energieverlustes bei 20 dB angenommen, d.h. $A_{MB} \leq 20$ dB.

9.4.2.5. Berechnung der Meteo-Boden-Dämpfung

Die Meteo-Boden-Dämpfung A_{MB} wird für jedes Empfängerelement (Teilvolumen) im maßgeblichen Empfängergebiet in Abhängigkeit von der Mitten-Frequenz *f* des Oktavbands bestimmt. Die Gesamt-Energieverluste aller Schallpartikel mit gleicher Reflektionshäufigkeit, die sich durch ein Empfängerelement bewegen, werden gemittelt. Die mittleren Gesamt-Energieverluste werden über alle Reflektionshäufigkeiten aufaddiert. Da die Quelle als inkohärent angenommen wird, bleiben Phasenbeziehungen unberücksichtigt.

Entfernung von der Schallquelle	L_{max}: -3 dB je Abstandsverdoppelung
	L_{eq}: -3 dB je Abstandsverdoppelung
	zusätzlich:
Absorption	ca. -1 dB je 100 m bei 1000 Hz
	ca. -5 dB je 100 m bei 4000 Hz
Bodeneffekte (schallweicher Boden)	ca. -10 dB bei flachem Schalleinfall
Refraktion	bis zu -25 dB bei Aufwärtsbrechung
	bis zu +9 dB bei Abwärtsbrechung
Streuung, Diffraktion	Limitierung der Dämpfung in Schattenzonen

Tabelle 9-1: Typische Werte der natürlichen Schalldämpfung (negative Werte = leiser)

9.4.3. Bestimmung der Wind- , Temperatur- und Feuchteprofile

Im Prinzip kann für die Ausbreitungsberechnung jedes gemessene oder simulierte Wind- und Temperaturprofil vorgegeben werden. Für die Berechnung von Langzeitpegeln und Überschreitungszonen (Lärmkonturen) ist es jedoch zweckmäßig die Wind- und Temperaturprofile aus wenigen Parametern herzuleiten, für die Häufigkeitsstatistiken verfügbar sind. Ausbreitungsrechnungen sind dann nur für bestimmte Profilklassen durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Rechnungen können anschließend nach Wichtung mit der Klassenhäufigkeit gemittelt werden.

9.4.3.1. Windprofil

Das Windprofil besteht aus drei Abschnitten, nämlich der auf dem Boden aufliegenden Prandtl-Schicht und der darüber befindlichen Ekman-Schicht und der freien Atmosphäre. Das Windprofil wird unter Vorgabe der Windgeschwindigkeit V_a in einer Bezugshöhe[4] z_a, des

[4] in der Regel z_a = 10 m über Grund

von der thermischen Schichtung abhängigen Winkels Ψ zwischen dem Wind in der Prandtlschicht und der freien Atmosphäre (geostrophischer Wind) und der aerodynamischen Rauigkeitslänge z_0 des Bodens bestimmt. In der Prandtlschicht wird ein logarithmisches Vertikalprofil angenommen, darüber eine Drehung bis hin zum Oberrand der Ekmanschicht, wo der Wind dem geostrophischen Wind gleicht. Oberhalb der Ekmanschicht wird keine Windänderung mit der Höhe berücksichtigt.

9.4.3.2. Temperaturprofil

Das Temperaturprofil besteht ebenfalls aus drei Abschnitten (Prandtl-Schicht, Ekman-Schicht und freie Atmosphäre). Der vertikale Temperaturgradient wird innerhalb der Schichten als konstant angenommen (abschnittsweise lineares Temperaturprofil):

- Prandtl-Schicht (zwischen dem Boden und ca. 10 bis 60 m über Grund)
- Ekman-Schicht (bis in eine Höhe von 100 bis 2000 m über Grund)
- freie Atmosphäre (darüber)

Es werden vier Schichtungstypen vorgesehen:

a) adiabatischer Gradient: $\gamma = -g/c_p \approx -0.01\,\mathrm{K\,m^{-1}}$

Der adiabatische Gradient ist charakteristisch für die Grenzschicht (Prandtl- und Ekmanschicht) tagsüber bei wolkenarmen Wetter oder nachts und tags bei starkem Wind.

b) Standard-Atmosphäre: $\gamma = -0.0065\,\mathrm{K\,m^{-1}}$

Die Standardatmosphäre ist charakteristisch für die Grenzschicht (Prandtl- und Ekmanschicht) tagsüber bei wolkenreichem Wetter und in der freien Atmosphäre (oberhalb der Grenzschicht).

c) isotherme Atmosphäre: $\gamma = 0$

Die isotherme Atmosphäre ist charakteristisch für die nächtliche Grenzschicht (Prandtl- und Ekmanschicht) bei wolkenreichem Wetter.

d) Inversion: $\gamma > 0$

Inversionen sind charakteristisch für die nächtliche Grenzschicht (Prandtl- und Ekmanschicht) bei wolkenarmen Wetter.

9.4.3.3. Feuchteprofile

Die Luftfeuchte findet derzeit keine Berücksichtigung.

9.5. Tabellen der Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse

Für die Integration in das Fluglärmberechnungsverfahren (Arbeitspaket 5A) werden Tabellenwerte der Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse für eine große Anzahl von Situationen berechnet. Die Situationen charakterisieren meteorologische Zustände, die Entfernung zwischen dem Flugzeugfußpunkt und dem Empfänger, den Winkel zwischen Windrichtung und Ausbreitungsrichtung, die Flugzeughöhe und die Frequenz. Insgesamt ergeben sich ca. 65000 Kombinationen.

9.5.1. Meteorologische Klassen

Es werden meteorologische Klassen eingeführt, die auf den Ausbreitungsklassen, d.h. einer Kombination aus Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen nach Klug-Manier, beruhen. Häufigkeitsstatistiken der Ausbreitungsklassen werden vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt.

	Stabilitätsklassen I und II **„stabil“**	Stabilitätsklassen III/1 und III/2 **„neutral“**	Stabilitätsklassen IV und V **„labil“**
V_{10m} = 0 m/s	X	X	X
V_{10m} = 1 m/s	X	X	X
V_{10m} = 2 m/s	X	X	X
V_{10m} = 5 m/s		X	
V_{10m} = 10 m/s		X	
V_{10m} = 20 m/s		X	

Tabelle 9-2: Zwölf Ausbreitungsklassen (grün) als Kombination von Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen.

9.5.2. Richtungs- und Entfernungsklassen

Der Winkel zwischen Windrichtung und Ausbreitungsrichtung wird in 12 Klassen mit einem Richtungsinkrement von 30° eingeteilt. Die Entfernung zwischen Flugzeugfußpunkt und dem Empfänger wird in acht Klassen mit den Nennwerten 50 ,100, 200, 400, 800,1600, 3200, und 6400 m eingeteilt.

9.5.3. Flughöhenklassifizierung

Die Flughöhen über Grund wurden in folgende Klassen mit den Nennwerten 50 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 m eingeteilt.

9.5.4. Frequenzklassen

Die Frequenzen wurden nach Oktavbändern mit den Nennwerten 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz eingeteilt.

9.5.5. Beispiele

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Visualisierung einer kleinen Auswahl vorausberechneter Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt.

9.5.5.1. Beispiel 1

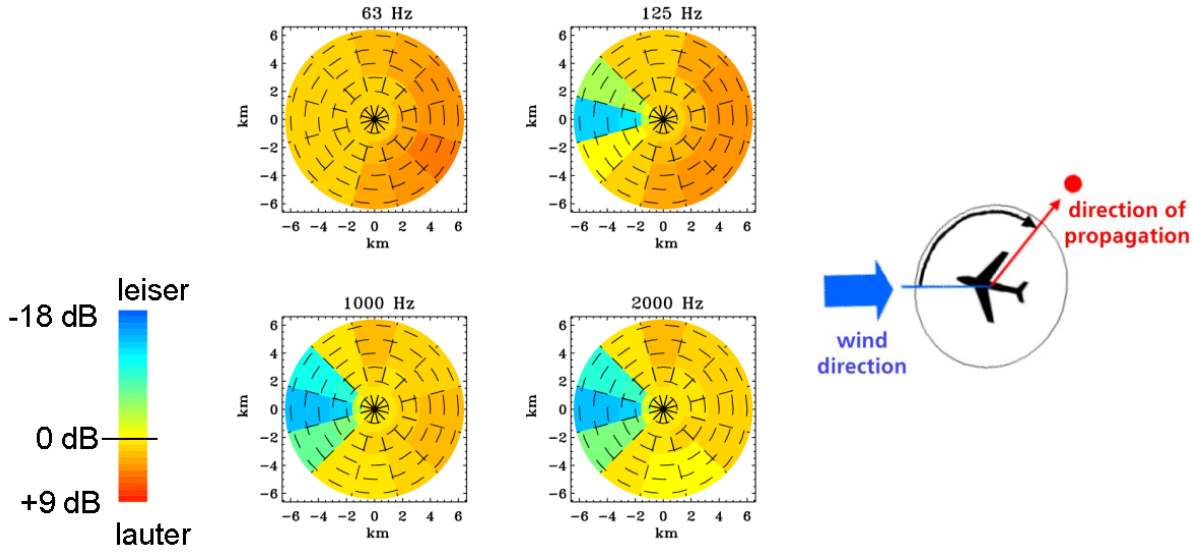


Abbildung 9-6: Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt (Beispiel 1)

Die Flughöhe beträgt 1600 m über Grund und es weht am Boden ein starker Wind mit 10 m/s. Bei einer derartigen Windgeschwindigkeit ist die Atmosphäre in der Regel vertikal gut durchmischt, d.h. die Temperaturschichtung ist neutral mit einer Temperaturabnahme von ca. 1 Kelvin je 100 m Höhe. Trotz der großen Flughöhe bildet sich bei Ausbreitung gegen den starken Wind in etwa 3 km Entfernung vom Flugzeugfußpunkt eine akustische Schattenzone (blau).

9.5.5.2. Beispiel 2

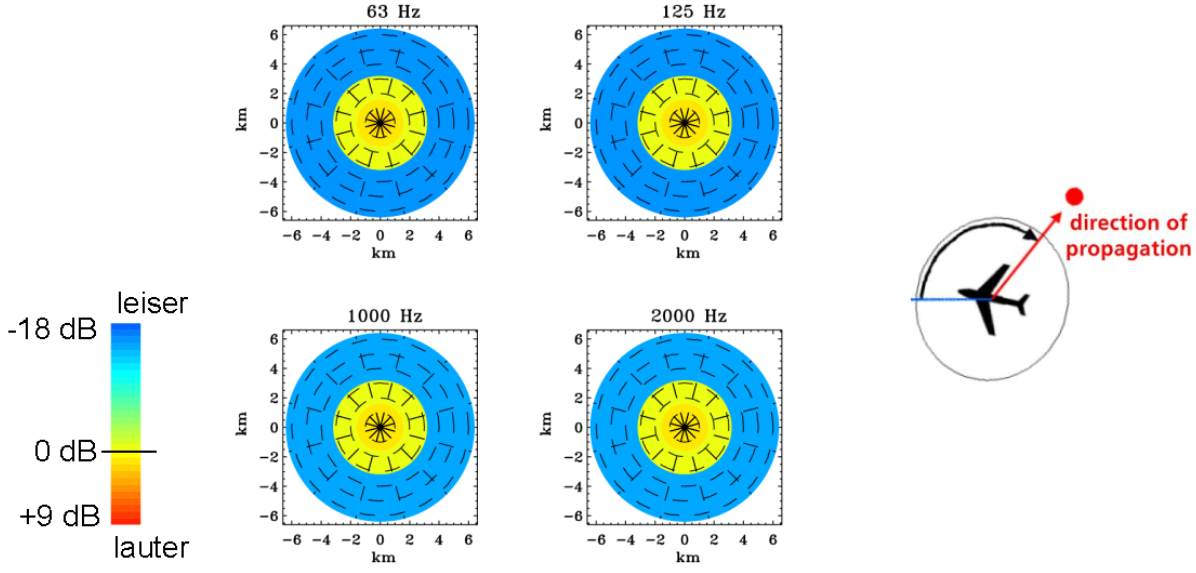


Abbildung 9-7: Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt (Beispiel 2)

Die Flughöhe beträgt nun lediglich 50 m über Grund und es ist windstill. Bei Windstille oder schwachem Wind und hoher Sonneneinstrahlung ist die Atmosphäre labil geschichtet und sehr turbulent, wobei die Temperatur in den unteren 500 m um mehr als 1 Kelvin je 100 m Höhe abnimmt. Wegen der Windstille ist die Dämpfung unabhängig von der Ausbreitungsrichtung. Wegen der niedrigen Flughöhe bildet sich nach 2-3 km Entfernung vom Flugzeug-Fußpunkt ein akustischer Schatten.

9.5.5.3. Beispiel 3

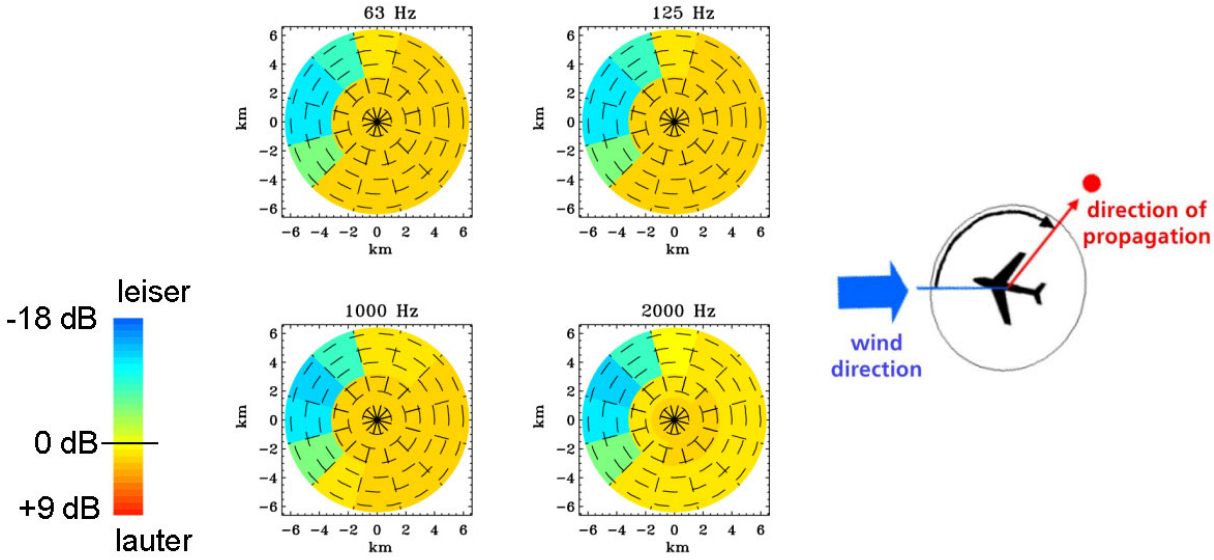


Abbildung 9-8: Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt (Beispiel 3)

Die Flughöhe beträgt 100 m über Grund und es weht ein schwacher Wind mit 2 m/s. Bei Windstille oder schwachem Wind und klaren Nächten ist die Atmosphäre stabil geschichtet, wobei die Temperatur häufig mit der Höhe zunimmt (Inversion). In dieser Situation bildet sich ein kaum ein akustischer Schatten. Vor allem die tiefen Frequenzen werden infolge von Mehrfachreflexionen in Windrichtung verstärkt.

10. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des von der HGF teilfinanzierten DLR-Projekts „Leiser Flugverkehr“ wurden Technologien, Werkzeuge und Maßnahmen erarbeitet die dazu beitragen, dass ein notwendiger und ausreichender Schutz der Bevölkerung vor unerwünschtem Fluglärm auch in Zukunft gewährleistet werden kann. Steigendes Luftverkehrsaufkommen, das für Deutschland als ein technisch hoch entwickeltes Land eine hinreichende Mobilität von Menschen und Fracht auch in Zukunft sichern soll, macht derartige Maßnahmen immer notwendiger.

Die Untersuchung war interdisziplinärer Art, um vorhandene Synergien ausnutzen zu können. Wissenschaftler aus den Bereichen Medizin, Aeroakustik, Flugmechanik, Flugführung, Lärmphysik, Atmosphärenphysik und Verkehrsforschung haben in koordinierter Weise zusammengearbeitet. Ausgangspunkt war die kausale Wirkungskette „Schallemission – Schallausbreitung - Schallimmission – Schallwirkung“. Innerhalb dieser Wirkungskette wurde an verschiedenen Punkte angesetzt:

- Die naheliegendste Möglichkeit, um die Lärmbelastung in der Nachbarschaft von Flughäfen zu mindern ist die Lärmreduktion an der Quelle selbst. Hier sind in der Vergangenheit beträchtliche Erfolge erzielt worden, allerdings ist mit einem gravierenden Technologiesprung durch die Entwicklung neuer Triebwerkstypen mittelfristig nicht zu rechnen. Zur gezielten Erarbeitung derartiger Technologien wurde aus dem Projekt – in enger Kooperation auf internationaler Ebene – beigetragen.
- Mittelfristig einsetzbare Maßnahmen sind operationeller oder administrativer Art (also z.B. lärmoptimierte Flugverfahren oder Maßnahmen wie Gebührensteuerung). Auch diesen Problemfeldern hat sich das Projekt gewidmet.
- Neben diesen Untersuchungen wurde sich auch mit der Entwicklung von modernen Lärmprognoseverfahren befasst. Derartige Verfahren werden als Planungshilfen in der Praxis regelmäßig eingesetzt. Insbesondere im Rahmen der anstehenden Novellierung des Fluglärmgesetzes und zur laufenden Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie werden derartige Werkzeuge benötigt.
- Letztendlich können aber lärmmindernde Maßnahmen nur dann sinnvoll geplant und eingesetzt werden, wenn die Reaktionen des Individuums Mensch auf den Fluglärm ausreichend bekannt sind. Da z.Z. insbesondere der nächtliche Fluglärm ein drängendes Problem darstellt, bildete eine umfangreiche Studie zu Lärmwirkungen eine der Kernaktivitäten des Projekts.

Lärmminderung am Triebwerk

Das technische Reduktionspotential für Triebwerkslärm wird von Fachleuten auf etwa 10 dB eingeschätzt. Es ist allerdings auf Grund der langen Entwicklungszeiten im Flugzeugbau nur langfristig vollständig ausschöpfbar. Gerade wegen der langen Entwicklungszeiten müssen moderne technische Konzeptionen zur Lärmminderung am Fluggerät allerdings schon jetzt untersucht und auf ihre praktische Anwendung hin überprüft werden.

Schwerpunkt der triebwerksbezogenen Arbeiten war die des Minderung Lärms, der durch den im Triebwerkseinlauf befindlichen sog. „Fan“ erzeugten wird. Nachdem bei modernen Triebwerken der Lärm des Düsenstrahls stark reduziert werden konnte, tritt der Fan mehr und mehr in den Vordergrund. Mit der geplanten Einführung von Triebwerken der 4. Generation wird dies in zunehmendem Maß eine Rolle spielen.

Eine mögliche Technologie zur Minderung der störender tonalen Komponenten des Fans ist der Einsatz aktiver Lärmminderung („Antischall“). Die Wirksamkeit des klassischen Ansatzes (Lautsprecher-Mikrofon-Kombination) konnte mit neu entwickelten Controller-Techologien im Modell demonstriert werden. Eine praktisch besser realisierbare neuartige Umsetzung des Konzepts bietet aber der Einsatz aerodynamischer Antischallquellen (z.B. durch gezieltes

Einblasen von Druckluft). Die im Projektrahmen erarbeiteten Basistechnologien sind Erfolg versprechend.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung bzw. Verbesserung von numerischen Verfahren zum lärmoptimierten Design eines Triebwerksfans. Ziel ist ein um 10 dB leiserer Fan. Diese Aktivitäten erfolgten in enger Kooperation mit externen Partnern aus der Triebwerksindustrie (z.B. in EU-Vorhaben). Dadurch ist gewährleistet, dass die entwickelten Verfahren auch in die Praxis umgesetzt werden können.

Neben diesen direkt im Projekt adressierten Themen wurde im Rahmen von Flugversuchen in Kooperation mit der Deutschen Lufthansa auch demonstriert, dass kurzfristig an bestehendem Fluggerät einsetzbare technische Maßnahmen zur Lärmminderung existieren. So ergaben sich beim Einsatz einer vom DLR konzipierten und von der Lufthansa gebauten „Chevron-Düse“ bei Testflügen an einer A319 Lärmreduktionen um 1 dB (höhere Pegelminderungen sind an der A321 mit ihrem wesentlich schnelleren Kernstrahl zu erwarten).

Minderung von Umströmungslärm

Zur Zeit ist der Lärm, der durch die Umströmung der Zelle – und hier insbesondere der Fahrwerke und Hochauftriebsklappen – erzeugt wird, nur bei niedrigen Triebwerksleistungen im Anflug von Bedeutung. Mit der zukünftigen Entwicklung leiserer Triebwerke wird sich dieses Problem aber verschärfen, insbesondere da das technologisch erreichbare Lärmminderungspotenzial beim Umströmungslärm vergleichsweise geringer ist als beim Triebwerk.

Basis der Untersuchungen waren grundlegende Analysen der verschiedenen Entstehungsmechanismen von Umströmungslärm an Fahrwerken und Hochauftriebssystemen, um Lärmminderungsmaßnahmen jeweils gezielt ansetzen zu können. Zur Minderung des Umströmungslärms von komplexen Fahrwerksstrukturen wurden (zusammen mit europäischen Partnern) aerodynamische Verkleidungen entwickelt, die ein Minderungspotenzial von 3 dB ergaben. Im Rahmen von Windkanalversuchen an Model- und Originalflügeln wurde der Vorflügel als maßgebliche Komponente des Hochauftriebslärms identifiziert. Die Wirksamkeit verschiedener Technologien zur Lärmminderung konnte dabei nachgewiesen werden. Insbesondere wurden halbempirische Quellmodelle für den Fahrwerks- und Hochauftriebslärm zur Anwendung in Prognoseverfahren entwickelt.

Im Rahmen der Überflugversuche mit der Lufthansa wurde außerdem die Wirksamkeit kurzfristig an bestehendem Fluggerät einsetzbarer Maßnahmen zur Minderung von Umströmungslärm demonstriert. Störende tonale Lärmkomponenten konnten beseitigt werden.

Lärmoptimierte Flugverfahren

Eine kurz- bis mittelfristig umsetzbare Maßnahme bilden lärmarme An- und Abflugverfahren. Sie basieren im wesentlichen auf einer Optimierung von Flughöhe, Triebwerksleistung, Geschwindigkeit und aerodynamischer Konfiguration des Flugzeugs.

Nach grundlegender Analyse wurden mehrere Konzepte lärmarmer Anflugverfahren erarbeitet. Dabei ergab sich im erweiterten Flughafenbereich ein lokales Lärmminderungspotential von bis zu 3 dB (durch Simulation in Zusammenarbeit mit dem Arbeitspaket Prognose ermittelt). Die Fliegbarkeit der Verfahren wurde durch Flüge mit dem DLR-Versuchsträger ATTAS demonstriert. Konzepte zur Integration solcher Verfahren in moderne Flugführungssysteme wurden ebenfalls erarbeitet.

Beim Abflug wurde eine neues Verfahren (Modern Noise Abatement Departure Procedure MONA) definiert. Dieses bietet einen Kompromiss zwischen Lärmminderung und Zeit- und Treibstoffverbrauch. Es ist mit bestehendem Gerät einsetzbar und durch Einführung einer Zwischenbeschleunigungsphase anpassbar an flughafenspezifische Gegebenheiten.

Lärmminderungskonzepte

Eine Analyse des Einsatzes von Lärmminderungsmaßnahmen wie z.B. lärmbezogenen Landegebühren ergab, dass derartige Maßnahmen in Deutschland aufgrund der Lage der Flughäfen in dichtbesiedelten Bereichen bezogen auf den weltweiten Durchschnitt vergleichsweise stark eingesetzt werden. Es ist allerdings noch weiteres Potential bei optimaler Einsetzung vorhanden. In weitergehenden Untersuchungen wurden zu präferierende Maßnahmen identifiziert. Allerdings ist in Zukunft das Problem einer optimierten Flächennutzungsplanung, das nicht im Projektumfang definiert war, verstärkt anzugreifen.

Zur Analyse der Auswirkung von Lärmminderungsmaßnahmen auf die Gesamtlärmbelastung wurde ein Computerprogramm erarbeitet. Hier können modellhaft einzelne, direkt lärmbezogene Maßnahmen (Typumschichtung oder –ausmusterung, Wirkung von verschärften Grenzwerten) schnell simuliert und ihre Wirkungen abgeschätzt werden.

Modelle zur Schallausbreitung und Lärmprognoseverfahren

Rechnerische Verfahren zur Lärmprognose bilden die Grundlage für Zwecke der Landesplanung, der Lärmschutzgesetzgebung und der Flughafenplanung. So kann ohne belastbare Prognoseverfahren die für zukünftige Flugbetriebe zu erwartende Lärmbelastung nicht ermittelt werden.

Ein wesentlicher Bestandteil von Prognoseverfahren ist die Modellierung von Schallausbreitungsvorgängen. Die zur Zeit in der Praxis benutzten Verfahren weisen hier hinsichtlich der Modellierung der meteorologischen Einflüsse Wind und Temperatur starke Defizite auf. Im Projekt wurde ein physikalisch umfassendes (und daher entsprechende aufwändiges und rechenzeitintensives) Modell zur Beschreibung der gekoppelten Wirkung von Boden und Atmosphäre auf die Schallausbreitung erarbeitet. Dieses stellt einen vollkommen neuartigen, integrierten Ansatz zur Behandlung des Problems dar. Aus dem Modell wurde dann ein praktisch umsetzbares, vereinfachtes Verfahren abgeleitet. Dieses hat den Vorteil, dass es auch in die vorhandenen, konventionellen Fluglärmberechnungsverfahren integriert werden kann.

Das Ausbreitungsmodell wurde dann in ein neu erarbeitetes Simulationsverfahren für Fluglärm integriert. Das Verfahren basiert auf einer Teilschallquellenmodellierung und berücksichtigt separat die Effekte von verschiedenen Triebwerks- und Umströmungslärmkomponenten. Das entsprechende Rechenprogramm wurde zur Auskopplung einzelner Module in Form von Black-Boxes konzipiert und kann auch mit Flugsimulatordaten gekoppelt werden.

Das Modell ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Datengrundlage primär für folgende Anwendungsbereiche geeignet: Optimierung von Flugverfahren (Einsatz erfolgte schon im Projekt), Immissionsberechnungen für exponierte Immissionsorte an denen konventionelle Verfahren versagen) und die Verbesserung bestehender konventioneller Modelle.

Fazit: War der interdisziplinäre Ansatz sinnvoll ?

In Abbildung 2-1 wurde ein Überblick über funktionale Zusammenhänge und mögliche Schnittstellen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen gezeigt. Es wirft sich die Frage auf, inwieweit das dort skizzierte Synergiepotential im Rahmen des Projekts auch genutzt wurde. Im Rahmen der Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete in den vorangegangenen Abschnitten ist dieser Aspekt des Projekts nicht ausführlicher thematisiert worden.

Die Antwort lautet, dass die gewählte Form eines interdisziplinären Ansatzes seine Berechtigung hatte. Dies sei an einigen Beispielen demonstriert:

- Die Arbeiten zur Lärmwirkungsforschung basierten natürlich zum großen Teil auf Techniken und Verfahren aus dem Bereich der Medizin und Psychologie. Bei der endgültigen Definition des Nachtfluglärmkriteriums mussten aber auch die Aspekte der Umsetzbarkeit berücksichtigt werden. Hier wurde in enger Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern aus dem Arbeitspaket 5A (Prognose) das Kriterium in einer Form definiert, die in ei-

ner rechnerischen Fluglärmprognose einsetzbar ist, die sich also an den im Rahmen einer solchen Untersuchung verfügbaren bzw. ermittelbaren Daten orientiert.

- Bei der Untersuchung von lärmoptimierten Flugverfahren im HAP 3 wurde z.T. das neu entwickelte Simulationsverfahren aus AP 5A eingesetzt. Dies erforderte zwangsläufig eine enge Kooperation zwischen beiden Arbeitspaketen. Der Erfahrungsaustausch ging hier in beide Richtungen: Für die im Rahmen des HAP 3 notwendigen Berechnungen mit dem INM wurden Erfahrungen seitens der Prognosegruppe bereitgestellt, während diese bei der Implementation flugmechanischer Problemstellungen in das SIMUL-Programm auf das Fachwissen der Arbeitsgruppe aus HAP3 zurückgreifen konnte.
- Auch im Rahmen der Arbeiten an verkehrspolitischen Konzepten im HAP 4 wurde eng mit AP 5A kooperiert – der Grundstein hierzu war schon Mitte der 90er Jahre in einer gemeinsamen Untersuchung für den Flughafen Hamburg gelegt worden. In der Praxis müssen Lärmminderungskonzepte ohnehin hinsichtlich ihrer Wirksamkeit durch Lärmphysikalische Untersuchungen überprüft werden. Entsprechend den Anforderungen der Arbeiten im HAP 4 wurde hier seitens der Prognosegruppe das Programm CEAR entwickelt, das eine schnelle Analyse der Effizienz lärmmindernder Maßnahmen erlaubt.
- Innerhalb des Hauptarbeitspakets 5 ergab sich zwangsläufig eine enge Kooperation zwischen den Bereichen Prognose und Schallausbreitungsmodellierung. Die gute Abstimmung in beiden Arbeitsgebieten führte letztendlich dazu, dass das entwickelte Schallausbreitungsmodell nicht nur speziell auf das SIMUL-Verfahren zugeschnitten ist, sondern auch in einfachere, praxisnähere Modelle implementiert werden kann.
- Entsprechendes gilt für die beiden Arbeitspakete zur Lärmminderung an der Quelle: Hier ergänzten sich u.a. unterschiedliche Messtechniken in ihrer Wirkungsweise. Innerhalb dieser Arbeitspakete bestand ohnehin schon Kooperation im Rahmen von EU-Projekten, in die z.T. auch die Aktivitäten zu lärmarmen Flugverfahren eingebunden wurden. Außerdem wurden für die Prognosemodelle halbempirische Verfahren zur Modellierung von Umströmungslärm erarbeitet.

Hier wird deutlich, dass die rechnerische Fluglärmprognose ein wesentlicher Verknüpfungspunkt war. Das ergibt sich allerdings auch zwangsläufig aus dem Anforderungen, die an diesen Arbeitsbereich gestellt werden: Der Prognostiker muss sowohl Kenntnis über die Mechanismen der Schallentstehung als auch über die Flugmechanik haben – mit verkehrspolitischen Lärmminderungskonzepten und Wirkungsfragen wird er im Rahmen seiner Arbeiten ohnehin konfrontiert.

Neben diesen direkten, problemspezifischen Schnittstellen bietet eine interdisziplinäre Projektform natürlich noch den generellen Vorteil, dass die Wissenschaftler aus den unterschiedlichen Arbeitsgebieten sich regelmäßig „an einen Tisch setzen“, über den aktuellen Arbeitsstand und auch über aufgetretene Probleme berichten. Gerade hinsichtlich des letzten Punkts wurde die Erfahrung gemacht, dass im Rahmen einer Diskussion mit fachfremden Kollegen Problemstellungen auch aus anderer Sicht interpretiert werden und somit auch alternative, für den Spezialisten nicht gleich offensichtliche Lösungsmöglichkeiten eingebracht werden.